

**В.А.Маляренко, О.М.Герасимова, О.І.Малєєв**

# **БУДІВЕЛЬНА ТЕПЛОФІЗИКА**

**КУРС ЛЕКЦІЙ**



**Харків – ХНАМГ – 2007**

**Міністерство освіти і науки України  
Харківська національна академія міського господарства**

**В.А. Малярєнко, О.М. Герасимова, О.І. Малєєв**

# **БУДІВЕЛЬНА ТЕПЛОФІЗИКА**

## **КУРС ЛЕКЦІЙ**

**для студентів  
усіх форм навчання будівельних спеціальностей**

**Харків – ХНАМГ – 2007**

**УДК 697.**

**Будівельна теплофізика.** Курс лекцій для студентів усіх форм навчання будівельних спеціальностей.

Укл.: Маляренко В.А., Герасимова О.М., Малєєв О.І. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 100 с.

Укладачі: д.т.н., проф. Віталій Андрійович Маляренко,  
доц. Ольга Михайлівна Герасимова,  
доц. Олександр Іванович Малєєв

Рецензент: к. т. н., доцент О.В.Ромашко

*Рекомендовано кафедрою ЕГТС, протокол № 9 від 22 вересня 2006 р.*

## ВСТУП

Від теплофізичних властивостей огорожуючих конструкцій залежить кількість теплоти, що втрачається будинком у холодну пору року і входить до нього в теплу. Це, в свою чергу, визначає навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря і їхню вартість, впливає на сталість температурного режиму в об'ємі приміщення з часом (при зміні температури, швидкості повітря зовні будинку, тепловіддачі системи опалення, температури на внутрішній поверхні огорожуючої конструкції). Вибір оптимальних теплофізичних характеристик огорожуючих конструкцій дозволяє виключити утворення конденсату на внутрішній стороні, а також установити вологісний режим, що сприятливо впливає на теплозахисні властивості огороження.

До основних експлуатаційних характеристик цивільних і промислових будинків відносяться довговічність, надійність та економічність, які багато в чому обумовлені особливостями тепловологісного стану їхніх конструктивних елементів. Необхідність дослідження тепловологісного стану виникає при проектуванні у процесі експлуатації, при модернізації та перебудові будинків під інші режими експлуатації, інтенсифікації технологічних процесів тощо. При цьому охоплюється широке коло завдань, основні з яких - тепловий розрахунок, у результаті якого знаходять температурні поля й опір теплопередачі, а також вологісний розрахунок, виходячи з якого оцінюють вологісний стан огорожуючих конструкцій, розраховують повітропроникнення і теплозасвоєння.

Процедура дослідження тепловологісного стану конструктивних елементів будинків і споруд зводиться до завдання оптимізації та керування системами з розподіленими параметрами. Її основні етапи наступні:

- виявлення фізичних особливостей процесу теплопереносу;
- складання та обґрунтування математичної моделі; розробка й вибір методів і засобів вирішення і реалізації сформульованих завдань;
- дослідження математичної моделі, перевірка спроможності (адекватності) запропонованої математичної моделі, розрахунок тепловологісного стану реального об'єкта;

- оцінка одержуваних рішень за сукупністю вимог до досліджуваних процесів, станів і методів керування ними;
- вибір раціональних конструктивних рішень і режимів експлуатації, а також визначення оптимальних параметрів досліджуваної системи.

Саме вони й становлять сутність теплового проектування та теплофізичних розрахунків.

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
Лекція 1. Теплофізичні характеристики будівельних матеріалів.....	6
Лекція 2. Теплове проектування зовнішніх огорожуючих конструкцій будівель.....	15
Лекція 3. Теплотехнічний розрахунок зовнішніх огорожуючих Конструкцій.....	26
Лекція 4. Опір теплопередачі конструктивних елементів зовнішніх огорожуючих конструкцій.....	38
Лекція 5. Методика розрахунку опіру теплопередачі деяких конструктивних елементів конструкцій.....	50
Лекція 6. Теплостійкість зовнішніх огорожуючих конструкцій.....	60
Лекція 7. Вологісний режим огорожуючих конструкцій. Розрахунок на можливу конденсацію пари.....	67
Лекція 8. Методики розрахунку опіру паропроникнення.....	77
Лекція 9. Повітропроникність зовнішніх огорожуючих конструкцій.....	89
Список літератури.....	99

# **Лекція 1**

## **ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Зміст цієї дисципліни – вивчення законів перенесення теплоти, вологи і повітря стосовно до будівельних матеріалів і конструкцій будинків, що огороджують.

До основних експлуатаційних характеристик цивільних і промислових будинків відносяться довговічність, надійність і економічність, що багато в чому обумовлені особливостями тепловологісного стану їхніх конструктивних елементів.

Вивчення законів тепловологопереносу і повітропроникнення дуже важливо для фахівців із проектування зовнішніх конструкцій будинків, що огороджують, з урахуванням усіх факторів, що можуть вплинути на експлуатацію цих конструкцій.

Особливо велике значення має знання і застосування теплофізичних законів в умовах широкого застосування в сучасному будівництві нових будівельних матеріалів і технологій. Від теплотехнічних властивостей зовнішніх конструкцій будинків, що огороджують, залежить кількість теплоти, що втрачається будинком у холодний період року і надходить у теплий період року. Це, в свою чергу, визначає навантаження на системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря.

При проектуванні зовнішніх огороджуючих конструкцій будинків необхідно вирішувати завдання взаємозв'язаного нестационарного тепломасопереносу, ускладненого нелінійністю теплофізичних характеристик матеріалу конструкцій (найчастіше багатошарових), фільтрацією вологого повітря, фазовими перетвореннями вологи, при змішаних граничних умовах.

Для більш поглибленого вивчення курсу «Будівельна теплофізика» рекомендується користуватися підручниками [4-6] і методичними вказівками [7].

**Будівельні матеріали мають такі теплофізичні характеристики:**

## **Пористість і густина**

**Пористість**  $p$ , % – процентне відношення об'єму пор до загального об'єму матеріалу. Більшість матеріалів, що застосовуються в будівництві, є пористими.

**Густина** матеріалу  $\rho$  характеризується масою матеріалу в об'ємі  $1\text{ м}^3$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

**Питома маса** матеріалу  $g$  виражається масою одиниці об'єму речовини, з якої складається матеріал, за умови, що в матеріалі зовсім немає пор.

Густина матеріалу залежить від питомої маси матеріалу й пористості, а для сипучих матеріалів від ступеня ущільнення. Для будівельних матеріалів густина може коливатися від 40 до  $7800\text{ кг/м}^3$ , пористість - від 5 до 98%.

Пористість, густина і питома маса зв'язуються в відношенням

$$p = \frac{g - \rho}{g} \cdot 100\%.$$

Чим більше пористість матеріалу, при фіксованій питомій масі, тим менше його густина і навпаки.

## **Вологість**

З ряду причин волога може накопичуватися в капілярах будівельних матеріалів і протягом тривалого часу залишатися там. При цьому розуміється тільки волога, що хімічно не зв'язана.

Від ступеня вологості матеріалу суттєво залежать його теплоємність і теплопровідність, у меншій мірі – густина.

Вологість матеріалу поділяють на два види – масову і об'ємну.

Масова вологість  $\omega_M$  виражається у відсотках і визначається відношенням маси вологи, що перебуває в зразку, до маси зразка в сухому стані:

$$\omega_M = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100,$$

де  $M_1$  і  $M_2$  – маса матеріалу до і після висушування.



Об'ємна вологість  $\omega_O$  – виражається у відсотках і визначається відношенням об'єму води, що утримується в зразку, до об'єму зразка:

$$\omega_O = \frac{V_1}{V_2} \cdot 100,$$

де  $V_1$  – об'єм води, що утримується в зразку матеріалу,  $V_2$  – об'єм зразка.

При однаковому значенні об'ємної вологості для двох матеріалів з різною густиною величина масової вологості буде різною: для матеріалу з меншою густиною масова вологість більше, ніж для матеріалу з більшою густиною.

Якщо відома масова вологість матеріалу  $\omega_M$  і його густина  $\rho$ , об'ємну вологість визначають за формулою

$$\omega_O = \frac{\omega_M \cdot \rho}{1000},$$

де  $\rho$  – густина матеріалу в сухому стані,  $\text{кг/м}^3$ .

## Теплопровідність будівельних матеріалів

Як ми вже зазначали, теплопровідність – це властивість матеріалів проводити тепло через свою масу. Для будь-якого матеріалу вона характеризується коефіцієнтом теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , що показує, яка кількість теплоти (Вт) передається через шар матеріалу в 1м при різниці температур на поверхнях шару в один градус.

Величина коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів змінюється в досить широких межах - від  $\lambda = 0,025$  (мінеральна вата) до  $\lambda = 3,49$  (граніт, гнейс, базальт). Теплопровідність металів, що застосовуються у будівництві, ще вище: для чавуну – 50, сталі – 58, алюмінію – 221, міді – 407  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Величина коефіцієнта теплопровідності для одного й того ж матеріалу не є постійною величиною і залежить від його вологості та температури, а також напрямку теплового потоку.

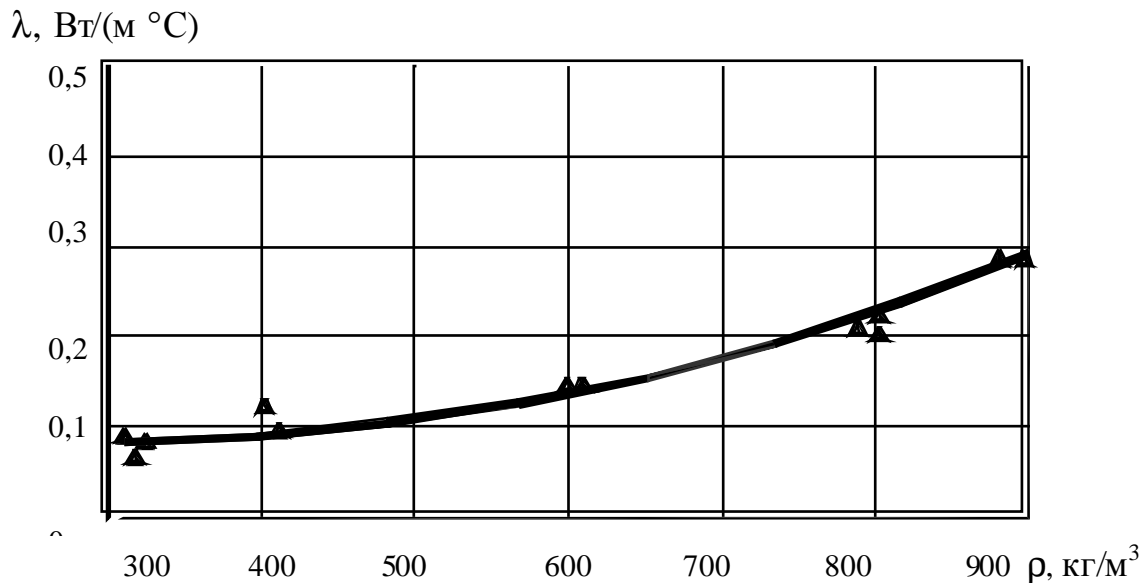


Рис. 1.1 – Залежність коефіцієнта теплопровідності газобетону від густини

**Залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від густини.** Для одного й того ж виду будівельного матеріалу з різною густиною коефіцієнт теплопровідності не постійний. Для матеріалу з меншою густиною він менший, з більшою густиною – більший. Для прикладу на рис. 1.1 показана залежність коефіцієнта теплопровідності газобетону від його густини.

Як видно, зміна коефіцієнта теплопровідності пов'язана зі зміною пористості будівельного матеріалу. Більшість будівельних матеріалів складаються з основи (кварцу, глинозему, кальциту і т.д.) і повітря, що знаходиться в порах.

Коефіцієнт теплопровідності основи матеріалу має значення, наведені в табл. 1.1, теплота в ньому передається тільки теплопровідністю. У дрібних порах теплота передається теплопровідністю і випромінюванням. При збільшенні розміру пор збільшується і наведений коефіцієнт теплопровідності повітря. Наприклад, при розмірі пор 0,1 мм  $\lambda = 0,024$ , при розмірі пор 2 мм  $\lambda = 0,031$  Вт/(м °С). Наведений коефіцієнт теплопровідності матеріалу складається з коефіцієнтів теплопровідності основи матеріалу і повітря, що утримується в порах, пропорційно об'ємним концентраціям цих компонентів.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнт теплопровідності основи матеріалу

№	Будівельний матеріал	Значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м °С)
1	Для органічних матеріалів	0,29 – 0,41
2	Для неорганічних матеріалів	3,25
3	Для кристалічних матеріалів	4,65 – 7,0
4	Кристалічних, але при потоці тепла паралельно кристалічній поверхні	14,0
5	Для пластмас	0,17 – 0,35

Крім того, на теплопровідність матеріалу впливає величина контактних площадок між окремими частками матеріалу: чим більше площа таких площадок, тим вище коефіцієнт теплопровідності. Це справедливо і для сипучих матеріалів. При зменшенні щільності й величини зерен зменшується величина повітряних прошарків між зернами і, як наслідок, знижується коефіцієнт теплопровідності. При збільшенні розмірів зерен коефіцієнт теплопровідності підвищується.

**Залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від його вологості.** Як було сказано вище, будівельні матеріали в експлуатаційних умовах мають певну вологість. Волога, що потрапила в матеріал, утримується в порах. Коефіцієнт теплопровідності води  $\lambda = 0,55$  Вт/(м °С), тобто в 20 разів більше, ніж коефіцієнт теплопровідності повітря в порах середнього розміру. Крім того, вода в порах збільшує розміри контактних площадок, що збільшує ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Механізм заповнення матеріалів вологою такий, що більш інтенсивно заповнюються дрібні капіляри. Чим дрібніші капіляри, тим інтенсивніше відбувається капілярне всмоктування рідини. Тому якщо розглядати залежність теплопровідності від вологості, то найбільш інтенсивне збільшення коефіцієнта теплопровідності відбувається на початковій стадії зволоження, коли заповнюються самі дрібні капіляри, які є найбільш ефективними теплоізоляторами матеріалу в сухому стані (рис. 1.2).

При температурі нижче температури початку замерзання рідини в порах матеріалу утворюється **кріофаза** (іній, лід), що призводить до збільшення теплопровідності системи основа – рідина – кріофаза. Відбувається це тому, що коефіцієнт теплопровідності льоду становить  $\lambda = 2,2$  Вт/(м °С), тобто в 5 разів більше ніж кое-

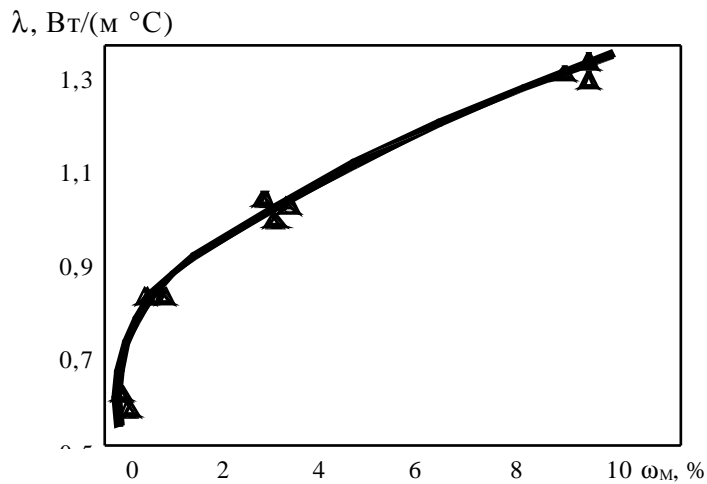


Рис. 1.2 – Залежність теплопровідності керамічної цегли від вологості

фіцієнт теплопровідності води і в 100 разів більше коефіцієнта теплопровідності повітря в порах середнього розміру. При утворенні в порах матеріалу інею величина коефіцієнта теплопровідності системи може знижуватися, оскільки теплопровідність пухкого інею менша теплопровідності води і льоду і становить  $\lambda$

$= 0,1 \text{ Вт/(м } ^\circ\text{С)}$ .

Температура фазового переходу вода – лід у порах матеріалу залежить від енергії зв'язку води з основою матеріалу, а отже і від його вологості. Причому чим вище енергія зв'язку, тим нижче температура замерзання рідини. Або чим сильніше зволожений матеріал, тим більше рідини перетвориться в лід за інших рівних умов. При малій вологості матеріалу волога в порах може не замерзати і при  $-40^\circ\text{С}$ .

Дані про величину коефіцієнта теплопровідності матеріалів у сухому стані, тобто величину коефіцієнта теплопровідності системи: основу матеріалу – повітря, наведені в СНиП II-3-79\*\* [1,6].

Для оцінки впливу величини вологості й кріюфази на теплопровідність матеріалу необхідно використовувати методики, наведені в підручнику [5].

**Залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури.** Теплопровідність будівельних матеріалів зростає при підвищенні температури, що пов'язано зі збільшенням кінетичної енергії молекул основи матеріалу. Крім цього при збільшенні температури також зростає теплопровідність повітря, що знаходиться в порах будівельних матеріалів, а також інтенсивність передачі тепла в порах матеріалу випромінюванням.

Зміна теплопровідності внаслідок коливань температури має невелике значення в будівельній практиці, тому що перепади температур при експлуатації конструкцій не перевищують  $100^\circ\text{С}$ . При застосуванні ж будівельних матеріалів для теплоізоляції поверхонь,

що мають високу температуру, вплив температури на коефіцієнт теплопровідності доводиться враховувати.

**Залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від напрямку теплового потоку.** Цей ефект спостерігається тільки для анізотропних матеріалів. Значення коефіцієнта теплопровідності для деревини залежно від напрямку теплового потоку наведені нижче.

Таблиця 1.2

Найменування матеріалу	Щільність, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ Вт/(м°С)
Сосна і ялина поперек волокон	500	0,14
Сосна і ялина вздовж волокон	500	0,29
Дуб поперек волокон	700	0,18
Дуб уздовж волокон	700	0,35

Дане явище пояснюється тим, що при напрямку перпендикулярно до волокон тепловому потоку доводиться долати опір великої кількості дрібних капілярів з повітрям. При русі потоку теплоти уздовж волокон теплота проходить по стінках капілярів. Це явище треба враховувати при проектуванні теплозахисних конструкцій з деревини і шаруватих матеріалів.

## Теплоємність

Властивість матеріалу поглинати або віддавати теплоту при підвищенні або зниженні температури називають теплоємністю і позначають буквою  $c$ . Питома теплоємність  $c$  показує кількість теплоти (Дж), яку необхідно передати або відвести від 1 кг матеріалу, щоб змінити його температуру на 1°С.

Найбільшу теплоємність з будівельних матеріалів має дерево – 2,3 кДж/(кг °С), найменшу сталь і мідь – 0,42 кДж/(кг °С). Теплоємність повітря при температурі +20°С становить 1,005 кДж/(кг °С), теплоємність води 4,183 кДж/(кг °С).

Оскільки більшість будівельних матеріалів являють собою складні композиції, приведена теплоємність композиції визначається за формулою

$$c = \frac{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2 + \dots + c_N \cdot m_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N},$$

де  $c_{1,2,3,\dots,N}$  – питомі теплоємності окремих компонентів;  $m_{1,2,3,\dots,N}$  – маса компонентів, що входять до складу композиції, кг.

При розрахунках температурних полів у огорожуючих конструкціях доводиться користуватися не величиною питомої теплоємності, а добутком питомої теплоємності на густину будівельного матеріалу

$$c\rho = \sum_{I=1}^N (c_I \cdot \rho_I \cdot m_I).$$

## Теплозасвоєння матеріалів

Коефіцієнт теплозасвоєння матеріалу огороження  $S$  характеризує його здатність сприймати теплоту при коливанні температури на поверхні. Значення цього коефіцієнта залежно від теплофізичних властивостей матеріалу ( $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ) і циклічної частоти коливання температури  $w = 2 \cdot \pi / Z$

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}{Z}},$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м<sup>°С</sup>);  $c$  – теплоємність, Дж/(кг<sup>°С</sup>);  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Очевидно, що коефіцієнт  $S$  в заданий розрахунковий період часу  $Z$  залежить тільки від властивостей матеріалу, тому його можна вважати фізичною характеристикою матеріалу огороження.

Звичайно в теплотехнічних розрахунках огорожень крім підлоги приймають період коливання  $Z = 24$  години, тоді

$$S_{24} = 0,51 \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}.$$

При розрахунку теплозасвоєння підлоги період нестационарних теплових впливів умовно приймається рівним 6 годин замість 24 годин. При  $Z = 6$  годин з рівняння (4.8)

$$S_6 = 1,02 \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} = 2 \cdot S_{24}.$$

Властивість теплозасвоєння матеріалу наочно ілюструє наступний приклад. Якщо стати босою ногою на підлогу із соснових дощок ( $S_{24} = 3,6$  Вт/(м<sup>2</sup>°С)), а потім на бетонну ( $S_{24} = 11,2$

Вт/(м<sup>2</sup>°C)), то в першому випадку здається, що підлога тепла, а в другому – холодна, хоч температура поверхні підлоги в обох випадках однакова. Це явище пояснюється тим, що організм людини реагує не на температуру навколишнього середовища, а на інтенсивність віддачі тепла тілом, тобто на тепловий потік. У випадку з дерев'яною підлогою буде відводитись менша кількість теплоти внаслідок невеликої величини теплосвоєння деревини, що й дає відчуття теплої підлоги. Наприклад:

Таблиця 1.3

	Коефіцієнт теплосвоєння $S$ Вт/(м <sup>2</sup> °C)
Лінолеум	8,5
Залізобетон	17,9
Плити мінераловатні	0,6

## Контрольні запитання

1. Яка структура більшості будівельних матеріалів?
2. Які теплофізичні характеристики будівельних матеріалів ви знаєте?
3. Яка буває вологість будівельних матеріалів?
4. Поясніть фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності матеріалу.
5. Від яких факторів залежить величина коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів?
6. Чому при від'ємних температурах коефіцієнт теплопровідності вологого матеріалу збільшується?
7. Поясніть фізичний зміст теплоємності матеріалу.
8. Поясніть фізичний зміст коефіцієнта теплосвоєння матеріалу.
9. Від яких факторів залежить величина коефіцієнта теплосвоєння будівельних матеріалів?
10. Чому при однаковій температурі поверхні підлога з цементу, якщо на неї стати босою ногою, здається більш холодною, ніж дерев'яна?

## **Лекція 2**

# **ТЕПЛОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ**

До основних експлуатаційних характеристик цивільних і промислових будинків відносяться довговічність, надійність та економічність, які багато в чому обумовлені особливостями тепловологісного стану їх конструктивних елементів.

Необхідність дослідження тепловологісного стану виникає при проектуванні, у процесі реконструювання та експлуатації. На кожному етапі ставляться конкретні завдання. Якщо на стадії проектування треба проводити багатофакторний розрахунок з відпрацювання оптимальної з погляду тепловологісного стану конструкції стін, перекриття, покриття, вікон і т.д., то при експлуатації потрібно визначити тепловологісний стан прийнятої конструкції в різних режимах роботи, а також оптимізувати експлуатаційні режими з урахуванням обмежень, що є наслідком геометричних особливостей, теплофізичних і міцнісних характеристик конструкції.

Незалежно від того, на якій стадії вивчається тепловологісний стан об'єкта, дослідження охоплює широке коло завдань, основні з яких – тепловий розрахунок, у результаті якого знаходяться параметри конструкції: температурні поля, опір теплопередачі; вологісний розрахунок, у результаті якого оцінюється вологісний стан огороджуючих конструкцій; розрахунок повітропроникнення і теплотозасвоєння.

Теплотехнічний розрахунок включає такі основні етапи:

- виявлення основних фізичних особливостей процесів;
- складання і обґрунтування математичної моделі кожного процесу;
- розробка і вибір відповідних методів і вирішення сформульованих завдань;
- розрахунок тепловологісного стану реального об'єкта; оцінка одержуваних рішень за сукупністю вимог до досліджуваних процесів, станах і методах керування ними;
- вибір раціональних конструктивних рішень і режимів експлуатації будівельних конструкцій.

Ці етапи становлять сутність тепловологісного проектування, під яким будемо розуміти дослідження процесів тепломасопереносу в огороджуючих конструкціях будинків, вибір конструктивних



рішень і режимів експлуатації з урахуванням тепловологісного стану досліджуваних об'єктів.

## Розрахункові теплові умови в приміщенні

Як було показано вище, при теплотехнічному проектуванні вирішується ряд завдань: досягнення комфортних параметрів середовища відповідно до санітарно-гігієнічних або технологічних вимог; створення і підтримка технологічних режимів роботи обладнання; економія енергоресурсів шляхом конструювання огорожуючих конструкцій, що мають певні теплозахисні властивості. При тепловому проектуванні огорожуючих конструкцій, будинків і споруд, розв'язанні питань теплозахисту звичайно вирішуються перше і третє завдання.

Введемо поняття мікроклімату.

Мікроклімат:  $t_B$  – температура внутрішнього повітря °С;  $V$  – швидкість повітря, м/с;  $\phi$  – відносна вологість повітря, %.

Комфортними параметрами мікроклімату вважаються такі сполучення температури, швидкості й відносної вологості повітря, температури оточуючих людину поверхонь, при яких в організмі зберігається тепла рівновага і відсутнє напруження в системі терморегуляції.

Відчуття теплового комфорту залежить від температури повітря  $t_{ПОВ}$ , а також температури внутрішніх поверхонь огорожуючих конструкцій приміщення. Температуру внутрішніх поверхонь огорожуючих конструкцій приміщення зручно описувати радіаційною температурою  $t_R$  відносно людини, яка перебуває в середині приміщення, що визначається як

$$t_R \approx \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i \cdot F_i)}{\sum_{i=1}^n F_i},$$

де  $\tau_i$  – середня температура за площею внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції  $F_i$ .

Температурний стан у приміщенні характеризується двома умовами теплової комфортності.

**Перша умова комфортного температурного стану** встановлює зону співвідношення температури повітря і радіаційної температури, при яких людина, перебуваючи в середині приміщення і віддаючи все наявне тепло, не відчувала б перегріву або переохолодження:

$$t_R = 1,57 \cdot t_{\Pi} - 0,57 \cdot t_{\Pi OV} \pm 1,5 ,$$

де  $t_{\Pi}$  – нормоване значення температури приміщення, яке залежить від інтенсивності виконаної людиною фізичної роботи і пори року, що відповідає комфортним тепловим умовам.

Таблиця 2.1 – Нормоване значення температури приміщення

Категорія робіт	Тепловіддача, Вт	Значення $t_{\Pi}$ в період року	
		холодний	теплий
Легка	до 172	21	26
Середньої важкості	172 – 293	18,5	24
Важка	Більше 293	16	22

**Друга умова комфортної температурної обстановки** обмежує інтенсивність променевого теплообміну і визначає допустимі температури нагрітих або охолоджених поверхонь, коли людина перебуває в безпосередній близькості від них.

Допустима температура поверхні стін і стелі в холодний період року:

- для нагрітих поверхонь  $\tau_{\Pi}^{ДОП} \leq 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{Л-П}} ;$
- для охолоджених поверхонь  $\tau_{\Pi}^{ДОП} \geq 23 - \frac{5}{\varphi_{Л-П}} ;$
- мінімально припустима температура внутрішньої поверхні вікон  $\tau_{ВІК}^{ДОП} \geq 14 - \frac{4,4}{\varphi_{Л-ВІК}} ,$

де  $\varphi_{Л-П}$ ,  $\varphi_{Л-ВІК}$  – коефіцієнти опромінення (відповідно людина – поверхня, людина – вікно) з найбільш не вигідно розташованої частини поверхні тіла людини у бік нагрітої або охолодженої поверхні. Їхню величину допускається визначати як

$$\varphi \approx 1 - \frac{0,8 \cdot y}{\sqrt{F}} ,$$

де  $y$  – відстань від найбільш невідгідно розташованої частини поверхні тіла людини до розглянутої;  $F$  – площа поверхні.

Самопочуття і стан здоров'я людини також залежить від співвідношення температури й відносної вологості повітря. Рис. 2.1 наочно ілюструє цей ефект.

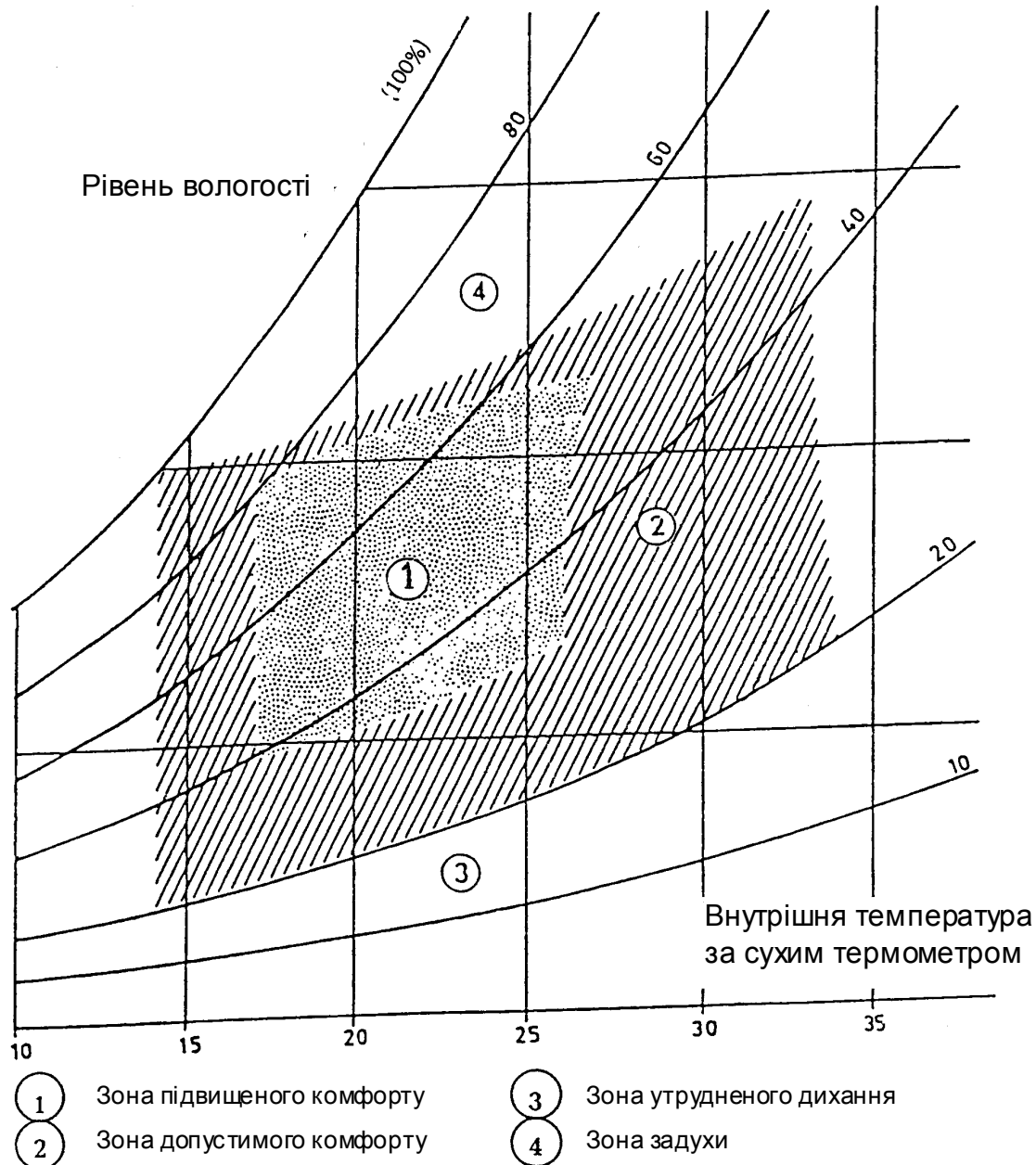


Рис. 2.1 – Самопочуття людей при сполученні температури і вологості повітря

Швидкість повітря у приміщенні в холодний період року більше 0,3 м/с сприймається як протяг. У теплий період року підвищення швидкості повітря понад 0,3 м/с може не викликати неприємних відчуттів.

## **Забезпеченість параметрів внутрішнього клімату**

Розрахункові теплові умови в приміщенні приймаються залежно від функціонального призначення, санітарно-гігієнічних вимог, умов технологічного процесу, а також ступеня забезпеченості підтримки заданих внутрішніх умов за будівельними й санітарними нормами.

Інженерні системи будинку (системи опалення, вентиляції, кондиціонування повітря) повинні підтримувати заданий температурний режим при будь-яких кліматичних і погодних змінах.

Однак виходячи з того, що екстремальні значення температур у цьому районі можуть і не спостерігатися за весь строк експлуатації будинку або споруди, розглядають забезпеченість підтримки заданих внутрішніх умов, що встановлює періодичність і тривалість відхилень параметрів мікроклімату приміщень від заданих розрахункових. Тобто забезпеченість внутрішніх умов залежить від ступеня екстремальності умов, прийнятих при проектуванні (температура зовнішнього повітря).

Параметри зовнішнього повітря приймають за [2] і додатками до кліматології, діючими в Україні [6].

Забезпеченість умов характеризується коефіцієнтом  $k_{ЗАБ}$ , величина якого за числом випадків показує (у частках одиниці або відсотках) число випадків, коли не припустиме відхилення заданих умов від розрахункових. Наприклад, температура холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,92 вказує на те, що тільки в чотирьох зимах з 50 (або восьми з 100) у періоди найбільших зимових похолодань тривалістю п'ять діб у приміщенні може спостерігатися зниження температури нижче розрахункової.

## **Необхідний і нормативний опір теплопередачі зовнішньої огорожуючої конструкції**

У СНиП «Строительная климатология и геофизика» наведені значення зовнішньої температури  $t_{ЗОВ}$  для проектування теплозахисту будинків усіх населених пунктів, розташованих на території України: температура найбільш холодної доби забезпеченістю 0,98 й 0,92, температура холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,98 й 0,92.

Вибір зовнішньої температури при проектуванні теплозахисту залежить від ступеня теплової інерції огорожуючої конструкції  $D$ ,

якою необхідно задаватися з наступним уточненням. Як показник теплової інерції прийнята величина  $D$  огороження, розрахована на коливання теплового потоку з періодом  $T = 24$  години.

Для безінерційних огорожуючих конструкцій з  $D < 1,5$  у як  $t_{3ОВ}$  приймається температура найбільш холодної доби забезпеченістю 0,98, для малоінерційних конструкцій з  $1,5 < D < 4$  як  $t_{3ОВ}$  приймається температура найбільш холодної доби забезпеченістю 0,92, для конструкцій середньої інерційності,  $4 < D < 7$  приймається температура найбільш холодних трьох діб забезпеченістю 0,92, обумовлена за  $t_{ХЗД} = \frac{(t_{Х1Д} + t_{Х5Д})}{2}$ , формулою температура найбільш холодної трьох доби приймається як напівсума температури холодної доби  $t_{Х1Д}$  й температури холодної п'ятиденки  $t_{Х5Д}$  забезпеченістю 0,92; для високоінерційних конструкцій з  $D > 7$  як розрахункову необхідно приймати температуру холодної п'ятиденки  $t_{Х5Д}$  забезпеченістю 0,92.

Як було сказано вище, тепловий комфорт у приміщенні визначається не тільки величиною температури повітря, але й інтенсивністю теплового потоку з відкритих поверхонь людського тіла на охолоджені огорожуючі конструкції (зимовий режим). Із цього випливає, що проектувана огорожуюча конструкція або її частина повинна пропускати тепловий потік не більший, ніж нормований, виходячи з наступних умов: теплового комфорту або відсутності конденсації водяної пари на внутрішній поверхні огорожуючої конструкції, забезпечення умов, що задаються технологією виробництва.

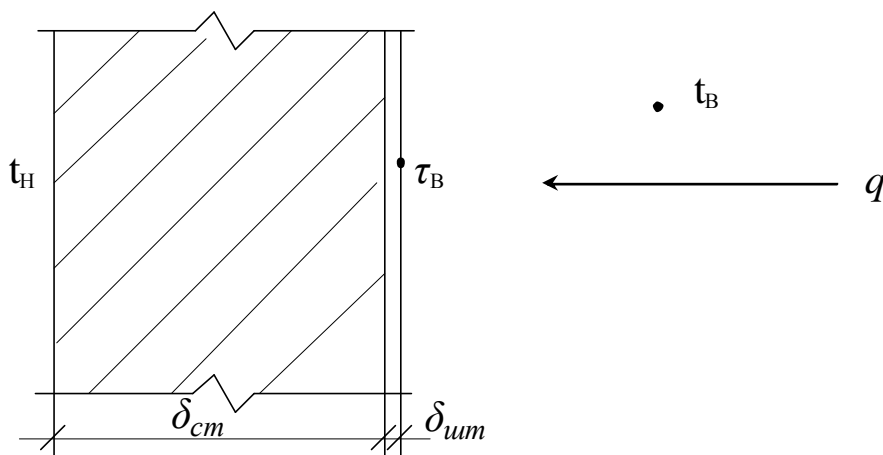


Рис. 2.2 – Конструкція зовнішньої стіни

В огорожуючу конструкцію зсередини приміщення входить тепловий потік

$$q = \alpha_{BH} \cdot (t_{BH} - \tau_{BH}), \quad (2.1)$$

де  $\alpha_{BH}$  – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні огорожуючої конструкції, Вт/(м<sup>2</sup> °С)  $\tau_{BH}$ , – температура внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції,  $t_{BH}$  – температура повітря всередині приміщення.

Величина питомого теплового потоку через огорожуючу конструкцію

$$q = \frac{t_{BH} - t_{3OBH}}{R_O}, \quad (2.2)$$

де  $R_O$  – опір теплопередачі огорожуючої конструкції, (м<sup>2</sup> °С)/Вт,  $t_{3OBH}$  – температура зовнішнього повітря.

В умовах стаціонарної теплопередачі ці потоки теплоти рівні між собою:

$$\alpha_{BH} \cdot (t_{BH} - \tau_{BH}) = \frac{t_{BH} - t_{3OBH}}{R_O}. \quad (2.3)$$

З (5.3) одержуємо формулу для визначення мінімально необхідного за санітарно-гігієнічними умовами опору теплопередачі огорожуючої конструкції:

$$R_O^{TP} = \frac{t_{BH} - t_{3OBH}}{\alpha_{BH} \cdot (t_{BH} - \tau_{BH})}. \quad (2.4)$$

Вираз у знаменнику  $t_{BH} - \tau_{BH}$  позначимо через  $\Delta t^H$  – нормований температурний перепад між температурою внутрішнього повітря й температурою внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції.

Для розрахунків значення  $\Delta t^H$  приймають за [1]. У виробничих приміщеннях з агресивним середовищем треба враховувати зниження значення тиску, що насичує, водяної пари повітря над розчинами солей, що приводить до підвищення температури точки роси й відносної вологості повітря.

У деяких випадках, коли огороження безпосередньо не стикається із зовнішнім повітрям (горищні, підвальні перекриття) різницю  $t_B - t_H$  необхідно уточнювати. Для цього в чисельник (2.4) вводиться поправочний коефіцієнт  $n$ , значення якого для деяких видів конструкцій, що огорожують, наведені в [1]; [6].

Таким чином, вираз для визначення необхідного за санітарно-гігієнічними нормами опору теплопередачі огорожуючої конструкції  $R_O^{TP}$ ,  $(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , за винятком заповнень світлових прорізів (вікон, балконних дверей і ліхтарів), отримує вигляд

$$R_O^{TP} = \frac{n \cdot (t_{BH} - t_{3OBH})}{\Delta t^H \cdot \alpha_{BH}}. \quad (2.5)$$

Останнім часом у зв'язку з ростом цін на енергоносії в усьому світі спостерігається тенденція до підвищення нормативного опору теплопередачі огорожуючих конструкцій житлових, громадських і виробничих будівель. Тому існуючі нормативні значення  $R_O^{TP}$  для огорожуючих конструкцій постійно переглядаються.

При розробці діючих українських нормативів з опору теплопередачі був обраний принцип енергетичної оптимізації, при якому досягається мінімум сумарних енерговитрат на виробництво конструкцій і опалення приміщень, що ними огорожують, за весь термін служби будинку.

У нормативних документах (зміни до СНиП II-3-79\*\*) зазначено, що опір теплопередачі огорожуючої конструкцій житлових і громадських будівель треба приймати більшим з двох значень: необхідного опору теплопередачі, обумовленого санітарно-гігієнічними нормами, і нормативного значення опору теплопередачі огорожуючих конструкцій, яке обирається для відповідної температурної зони України [6].

Опір теплопередачі огорожуючої конструкції виробничих приміщень треба приймати більшим з двох значень: необхідного опору теплопередачі, обумовленого санітарно-гігієнічними нормами, і економічно доцільного значення опору теплопередачі огорожуючих конструкцій

$$R_{EK} = R_O^{TP} \cdot r_{E\Phi},$$

де  $r_{E\Phi}$  – коефіцієнт, який залежить від виду конструкції, що огорожує [1] [6].

Необхідний опір теплопередачі вікон і балконних дверей житлових і громадських будинків приймають відповідно до температурної зони, в якій перебуває об'єкт будівництва ([6]). Необхідний опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій виробничих приміщень приймають за таблицею, виходячи з призначення примі-

щення, різниці температури внутрішнього повітря та середньої температури найбільш холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,92, °C. При проектуванні житлових і громадських будинків слід враховувати, що площа вікон (з наведеним опором теплопередачі менше 0,56 (м<sup>2</sup> °C)/Вт) стосовно до сумарної площі світлопрозорих і непрозорих огорожуючих конструкцій, стін повинна бути не більше 18 %.

## Методика розрахунку опору теплопередачі

Виходячи з основ теорії теплопередачі, опір теплопередачі  $R_O$  (м<sup>2</sup> °C)/Вт огорожуючої конструкції (зовнішні стіни, бездахове покриття, перекриття даху і над неопалюваними підвалами) у загальному випадку визначається за формулою

$$R_O = R_{BH} + R_K + R_{ЗОВН}, \quad (2.5')$$

де  $R_{BH}$  й  $R_{ЗОВН}$  – опору тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні огороження;  $R_K$  – термічний опір огорожуючої конструкції, (м<sup>2</sup> °C)/Вт.

Термічний опір огорожуючої конструкції  $R_K$  з послідовно розташованими однорідними шарами являє собою суму термічних опорів окремих шарів

$$R_K = R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{ПОВ.П}, \quad (2.6)$$

де  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – термічні опори окремих шарів огорожуючої конструкції (м<sup>2</sup> °C)/Вт, які визначають за формулою

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2.7)$$

де  $\delta$  і  $\lambda$  – відповідно товщина, м, і коефіцієнт теплопровідності даного матеріалу, Вт/(м °C);  $R_{ПОВ.П}$  – опір теплопередачі замкнутого повітряного прошарку.

При наявності вентильованого повітряного прошарку з якої-небудь сторони огорожуючої конструкції її термічний опір слід визначати як суму термічних опорів окремих шарів, починаючи від повітряного прошарку до протилежної поверхні.

Якщо конструкція неоднорідна (багат шарові кам'яні стіни полегшеної кладки з теплоізоляційним шаром, багат шарові бетонні панелі з теплопровідними включеннями і т.п.), приведений опір теплопередачі слід визначати в такий спосіб:



а) огорожуюча конструкція або її розглядувана частина умовно розрізається на ділянки площинами, паралельними напрямку теплового потоку. При цьому деякі ділянки можуть бути однорідними (складатися з однорідного матеріалу), інші неоднорідними (складатися з шарів різних матеріалів) і термічний опір огорожуючої конструкції  $R_a$  ( $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ) визначається за формулою

$$R_a = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}, \quad (2.8)$$

де  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – площі окремих ділянок конструкції,  $\text{м}^2$ ;  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – термічні опори вказаних окремих ділянок конструкції, що визначаються за (2.7) для однорідних ділянок конструкції і за (2.6) для неоднорідних;

б) огорожуюча конструкція або її розглядувана частина умовно розрізається на ділянки площинами, перпендикулярними до напрямку теплового потоку. При цьому деякі ділянки можуть бути однорідними (складатися з однорідного матеріалу), інші неоднорідними (складатися із шарів різних матеріалів) термічний опір визначається за (2.7) для однорідних ділянок конструкції і за (2.8) для неоднорідних.

Термічний опір огорожуючої конструкції  $R_\delta$ , ( $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ) визначається як сума термічних опорів окремих однорідних і неоднорідних шарів за формулою (5.10).

Приведений термічний опір огорожуючої конструкції визначається як

$$R_K^{PP} = \frac{R_a + 2 \cdot R_\delta}{3}. \quad (2.9)$$

Якщо  $R_a$  перевищує  $R_\delta$  більше ніж на 25 % або огорожуюча конструкція не є плоскою (має виступи на поверхні), то приведений термічний  $R_K^{PP}$  опір треба визначати за результатами розрахунків температурних полів.

За формулами (2.6), (2.8), (2.7) можна визначити приведений опір теплопередачі відносно простої (однорідної) огорожуючої конструкції.

Якщо конструкція має велику кількість різноманітних елементів, то використовують методики розрахунку температурних полів [4,5].

## **Контрольні запитання**

1. Що розуміється під поняттям мікроклімату приміщення?
2. Які теплові умови мікроклімату в приміщеннях називаються комфортними?
3. Що характеризує перша умова комфортності температурного стану?
4. Що обмежує друга умова комфортності температурної обстановки?
5. Як у теплотехнічних розрахунках огороджуючих конструкцій враховується мінливість температури зовнішнього повітря?

### Лекція 3

## ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Сучасні конструкції, що застосовуються в будівництві, мають велику кількість різнорідних елементів (багатошарові залізобетонні панелі та ін.). Розраховувати приведений опір теплопередачі таких конструкцій за допомогою даної методики досить складно. Це завдання може бути вирішене на основі аналізу *температурного поля* огорожуючої конструкції.

**Методика розрахунку температурних полів.** Досліджувана конструкція розбивається на геометричні форми кінцевого розміру. Критерієм вибору геометричної форми служить можливість найбільш точного опису контурів розглянутої області. Таким чином, на досліджувану область наноситься просторова сітка. Розрахунковими точками є вузли сітки. Межі досліджуваної області повинні збігатися із межами сітки. Якщо конструкція неоднорідна, площини сітки повинні збігатися з площинами розділу неоднорідних областей.

Формулюють математичну модель, що описує процес теплопровідності для даної конструкції, і умови однозначності. Розв'язання рівнянь шукають для всіх розрахункових точок (вузлів сітки). Як було показано в другій лекції, диференціальні рівняння для всіх вузових точок сітки перетворюють за допомогою кінцево-різницевого співвідношення у систему алгебраїчних рівнянь. У результаті їхнього розв'язання, для кожної вузової точки сітки, у тому числі на поверхні огорожуючої конструкції знаходять значення температури для сталого теплового потоку.

Далі, виходячи з отриманих розрахункових даних, встановлюють середнє значення температури внутрішньої  $\tau_{BH.CEP}$  і зовнішньої  $\tau_{ЗОВН.CEP}$  поверхонь огорожуючої конструкції, і обчислюють величину теплового потоку  $q^{PO3P}$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$q^{PACH} = \alpha_{BH} (t_{BH} - \tau_{BH.CEP}) = \alpha_{ЗОВН} (\tau_{ЗОВН.CEP} - t_{ЗОВН}),$$

де  $\alpha_{BH}$ ,  $\alpha_{ЗОВН}$  – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні огорожуючої конструкції, Вт/(м<sup>2</sup> °C);  $t_{BH}$ ,  $t_{ЗОВН}$  – температура внутрішнього й зовнішнього повітря, °C.

Нарешті, знаходять приведений термічний опір конструкції:

$$R_K^{PP} = \frac{\tau_{BH.CEP} - \tau_{3OBH.CEP}}{q^{PO3P}}.$$

Як ми вже зазначали, наявність теплопровідних включень істотно знижує теплозахисні властивості огорожуючих конструкцій. У місцях теплопровідних включень утворюються так звані, «містки холоду», в зонах яких лінії рівних температур (ізотерми) підходять ближче до внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції.

Якщо температура внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції нижче температури точки роси, відбувається термічна конденсація водяної пари з повітря приміщення, що неприпустимо для більшості огорожуючих конструкцій, тому що призводить до їхнього псування.

**Таблиця 3.1 – Коефіцієнт теплотехнічної однорідності деяких елементів зовнішніх огорожуючих конструкцій**

№ п/п	Вид стін і використані матеріали	Коефіцієнт теплотехнічної однорідності, $r$
1	З одношарових легкобетонних панелей	0,9
2	З легкобетонних панелей з термовкладками	0,75
3	Тришарові залізобетонні панелі з ефективним утеплювачем і гнучкими зв'язками	0,75 - 0,95
4	Те ж із залізобетонними шпонками або ребрами з керамзитобетону	0,6 - 0,8
5	Те ж із залізобетонними ребрами	0,5 - 0,65
6	Тришарові металеві панелі з утеплювачем з пінопласту без обрамлень у зоні стику	0,75 - 0,95
7	Те ж з обрамленням у зоні стику	0,65 - 0,8
8	Із тришарових азбестоцементних панелей з ефективним утеплювачем	0,7

У цілому розрахунок температурних полів є досить трудомістким завданням, тому для наближеної оцінки впливу теплопровідних включень на приведений опір теплопередачі огорожуючої конструкції вводиться коефіцієнт теплотехнічної однорідності –  $r$ , що визначає зниження приведенного опору теплопередачі конструкції в порівнянні з опором теплопередачі конструкції поза зоною їхнього впливу. Зоною впливу теплопровідного включення називається область, в якій відбувається викривлення ліній рівних температур (ізотерм). Зона, в якій ізотерми паралельні зовнішнім граням конструкції, називається гладдю.

У табл. 3.1 наведені значення цього коефіцієнта для деяких елементів зовнішніх огорожуючих конструкцій

**Опір тепловіддачі на внутрішній огорожуючій поверхні конструкції  $R_{BH}$ .** Розраховують за формулою

$$R_{BH} = \frac{1}{\alpha_{BH}}, \quad (3.1)$$

де  $\alpha_{BH}$  – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції: стін, підлоги, стелі, Zenітних ліхтарів.

Коефіцієнт  $\alpha_{BH}$  є розрахунковою характеристикою процесу теплообміну й враховує як конвективну, так і променисту складового загального теплового потоку  $q$  на внутрішній поверхні огороження, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \alpha_{BH} \cdot (t_{BH} - \tau_l), \quad (3.2)$$

$$q = q_K + q_{ВИПР}, \quad (3.3)$$

де  $q_K$ ,  $q_{ВИПР}$  – тепловий потік, що надходить на одиницю площі поверхні шляхом конвекції і випромінювання відповідно:

$$q_K = \alpha_K \cdot (t_{BH} - \tau_l); \quad (3.4)$$

$$q_{ВИПР} = \alpha_{ВИПР} \cdot (t_R - \tau_l), \quad (3.5)$$

де  $\alpha_K$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup>°С);  $\alpha_{ВИПР}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м<sup>2</sup>°С);  $t_{BH}$  – температура внутрішнього повітря приміщення, °С;  $\tau_l$  – температура внутрішньої поверхні огороження, °С.

Для спрощення розрахунку променистого теплообміну вводиться середня радіаційна температура приміщення відносно поверхні, що розраховується,  $t$  °С, що визначається як усереднена температура всіх поверхонь, що оточують внутрішню поверхню:

$$t_R = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i \cdot \tau_i)}{\sum_{i=1}^N F_i}. \quad (3.6)$$

Коли приблизно прийняти  $t_{BH} \cong t$ , то з рівнянь (3.2), (3.3), (3.4) і (3.5) випливає, що

$$\alpha_{BH} = \alpha_K + \alpha_{ВИПР}. \quad (3.7)$$

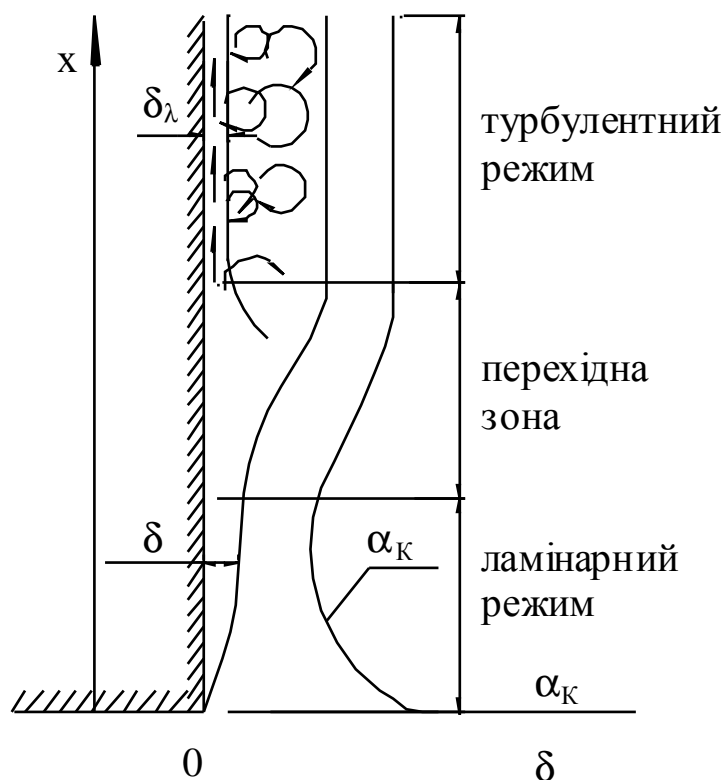


Рис. 3.1 – Схема розвитку конвективних потоків біля нагрітої поверхні

Зі змінною температури повітря і його рухливості уздовж поверхні теплообміну значення коефіцієнта конвективного теплообміну також змінюється. Для розрахунків приймають середнє значення  $\alpha_K$ . У загальному випадку коли мають місце два режими руху повітря – ламінарний і турбулентний, середній коефіцієнт тепловіддачі на поверхні вертикальної стіни визначають за формулою

$$\alpha_K = \frac{\alpha_K^{LAM} \cdot h_{KP} + \alpha_K^{TYP} \cdot (h - h_{KP})}{h}, \quad (3.8)$$

де  $\alpha_K^{LAM}$ ,  $\alpha_K^{TYP}$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі в ламінарному й турбулентному режимах відповідно;  $h$  – загальна висота стіни, м,  $h_{KP}$  – критична висота, на якій відбувається перехід від ламінарного до турбулентного режиму.

Кількість теплоти в процесі теплообміну випромінюванням на поверхні огороження встановлюють за рівнянням Стефана-Больцмана. Наприклад, для двох довільних поверхонь  $F_1$  й  $F_2$  (рис. 3.2) тепловий потік, Вт, з поверхні 2 на поверхню 1 при теплообміні випромінюванням дорівнює

$$\begin{aligned} Q_{1-2} &= \varepsilon_{ПП} \cdot C_O \cdot \varphi_{1-2} \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1 = \\ &= \varepsilon_{ПР} \cdot C_O \cdot \varphi_{1-2} \cdot b_{1-2} (t_2 - t_1) \cdot F_1 = \alpha_L \cdot (t_2 - t_1) \cdot F, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $T_1$ ,  $T_2$  та  $t_1$ ,  $t_2$  – температури взаємопроміненних поверхонь у градусах К і С відповідно;  $F_1$  – площа розглянутої поверхні, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{ПР}$  – приведений відносний коефіцієнт випромінювання. З огляду на ра-

діяційні властивості поверхонь огорожень, у розрахунках звичайно приймають  $\varepsilon_{\text{ПР}} \approx 0,85$ ;  $C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $C_0 = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)$ ;  $\varphi_{1-2}$  – коефіцієнт опромінення (або кутовий коефіцієнт),  $b_{1-2}$  – множник у рівності

$$\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 = b_{1-2} \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.10)$$

величину якого знаходять за формулою

$$b_{1-2} = 0,81 + 0,01 \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} = 0,81 + 0,005 \cdot (t_1 + t_2). \quad (3.11)$$

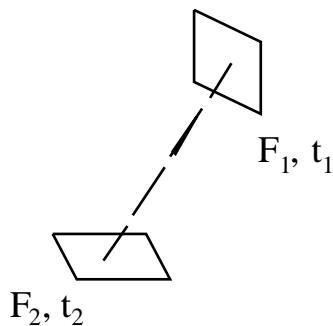


Рис. 3.2 – Теплообмін між двома поверхнями

Коефіцієнт променистого теплообміну  $\alpha_{\text{ПРОМ}}$  поверхні  $F_1$  з поверхнею  $F_2$  у такому разі визначають як

$$\alpha_{\text{ПРОМ}} = \varepsilon_{\text{ПР}} \cdot C_0 \cdot \varphi_{1-2} \cdot b_{1-2} = 4,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (3.12)$$

за умови, що  $\varphi_{1-2} \approx 1$  й  $b_{1-2} \approx 1$ .

Наближене значення  $\alpha_{\text{ПРОМ}}$ , встановлене за (3.12) звичайно використовується в розрахунках променистого теплообміну в приміщенні; для герметичних повітрян

ряних прошарків  $\alpha_{\text{ПРОМ}} = 3,97 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Якщо шляхом введення радіаційної температури (3.6) врахувати всі поверхні, що беруть участь у променистому теплообміні з поверхнею  $1$ , то рівняння (3.9) при  $F_1 = 1 \text{ м}^2$  матиме вигляд виразу (3.5):

$$q_{\text{ПРОМ}} = \alpha_{\text{ПРОМ}} \cdot (t_R - t_1).$$

Отже, виходячи зі сказаного, коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні  $\alpha_{\text{ВН}}$  можна знайти як

$$\alpha_{\text{ВН}} = \alpha_K + \alpha_{\text{ПРОМ}}.$$

Експериментальні значення коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній поверхні для різних огорожуючих конструкцій наведені в табл. 3.2.

**Опір тепловіддачі на зовнішній поверхні огорожуючої конструкції  $R_{\text{ЗОВН}}$ .** Обчислюють за формулою

$$R_{\text{ЗОВН}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ЗОВН}}}, \quad (3.13)$$

де  $\alpha_{\text{ЗОВН}}$  – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні огорожуючої конструкції, Вт/(м<sup>2</sup> °С).

**Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній поверхні огорожуючої конструкцій**

№	Внутрішня поверхня огорожуючої конструкції	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{ВН}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)
1	Стін, підлог, гладких стель, стель із виступаючими ребрами при відношенні висоти ребра $h$ до відстані $\alpha$ між гранями сусідніх ребер $h/\alpha \leq 0,3$	8,7
2	Стель з виступаючими ребрами при відношенні $h/\alpha > 0,3$	7,6
3	Зенітних ліхтарів	9,9

Теплообмін на зовнішніх поверхнях огорожуючих конструкцій, як і на внутрішніх, відбувається конвекцією та випромінюванням. Тому процеси на зовнішніх поверхнях описуються рівняннями, аналогічними виразам (3.2), (3.3), (3.4) і (3.5).

**Теплообмін у зимових умовах.** Температура землі, неба, оточуючих будинків та інших поверхонь, які беруть участь у променистому теплообміні із зовнішньою поверхнею огороження, різні. Оскільки в холодний період року частка випромінювання в сумарному теплообміні невелика (10 – 14 %), у наближених розрахунках радіаційну температуру навколишніх поверхонь приймають рівною розрахунковій температурі зовнішнього повітря. Тоді можна вважати

$$\alpha_{\text{ЗОВН}} = \alpha_K + \alpha_{\text{ПРОМ}}, \quad (3.14)$$

де  $\alpha_K$ ,  $\alpha_{\text{ПРОМ}}$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням відповідно на зовнішній поверхні огороження.

Конвективний теплообмін на зовнішній поверхні огорожень  $\alpha_K$ , Вт/(м<sup>2</sup>°С), що в основному залежить від швидкості вітру, для зимових умов знаходять за співвідношенням

$$\alpha_K = 7,34 \cdot w^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91w}, \quad (3.15)$$

де  $e = 2,718$  – основа натуральних логарифмів;  $w$  – середня швидкість вітру з румбів за січень, повторюваність яких становить 16 % і



більше. Значення розрахункових швидкостей для горищних перекриттів, поверхня яких виходить на горище, захищене від вітру, приймають  $w = 5$  м/с. Для зовнішніх поверхонь, що виходять у замкнуте приміщення,  $\alpha_K$  визначають як для внутрішніх поверхонь огороження.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням  $\alpha_{ПРОМ}$  знаходять за формулою (3.12), в якій наведений коефіцієнт випромінювання  $\varepsilon_{ПР}$  дорівнює

$$\varepsilon_{ПР} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \approx \varepsilon_1, \quad (3.16)$$

де відносний коефіцієнт випромінювання  $\varepsilon_2 = C_2 / C_0$ ,  $\varepsilon_1$  – відносний коефіцієнт випромінювання будівельних матеріалів,  $\varepsilon_1 \approx 0,9 - 0,95$ .

При цьому припускається, що коефіцієнт випромінювання оточуючого середовища будинку  $C_2$  дорівнює коефіцієнту випромінювання абсолютно чорного тіла  $C = 5,77$  Вт/(м<sup>2</sup>°С<sup>4</sup>) (це допущення прийняте з умови, що будинок протистоїть оточенню, яке охоплює його з усіх боків).

При проектуванні систем опалення й вентиляції будинків згідно із СНиП рекомендується приймати наступне значення  $\alpha_{ЗОВН}$  для зимових умов [1] [6].

**Теплообмін у літніх умовах.** Влітку умовна температура неба  $t_O$  значно нижче температури повітря  $t_{ПОВ}$ . Температура неба визначається в безхмарні дні відповідно до температури повітря й парціального тиску водяної пари в повітрі біля поверхні землі

$$T_O = T_H \cdot \sqrt[4]{0,526 + 0,075 \cdot \sqrt{e'}}, \quad T_O = 273 + t_O,$$

де  $e'$  – парціальний тиск водяної пари, виміряний в мілібарах (1 мб = 0,75 мм рт. ст.),  $T_H$  – абсолютна температура повітря,  $T_H = 273 + t_H$ .

Значення різниці температур зовнішнього повітря біля поверхні землі  $t_H$  і піднебіння  $t_O$  наведені в табл. 5.9. Ці дані отримані для безхмарних днів у нічний і денний час; якщо небо вкрите хмарами, різниця  $\Delta t$  зменшується.

Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнта тепловіддачі для зимових умов

Зовнішня поверхня огорожуючої конструкції	Коефіцієнт тепловіддачі для зимових умов $\alpha_{ЗОВН}$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)
1. Зовнішніх стін, покриттів, перекриттів над проїздами й над холодними (без огорожуючих стінок) підпіллями в північній кліматичній зоні	23
2. Перекриттів над холодними підвалами, що сполучаються із зовнішнім повітрям; перекриттів над холодними (зі огорожуючими стінками) підпіллями й холодними поверхнями в північній кліматичній зоні	17
3. Перекриттів горищних і над неопалювальними підвалами зі світловими прорізами в стінах, а також зовнішніх стін з повітряним прошарком, вентильованим зовнішнім повітрям	12
4. Перекриттів над неопалювальними підвалами без світлових прорізів у стінах, розташованих вище рівня землі, і над неопалювальними технічними підпіллями, розташованими нижче рівня землі	6

Таблиця 3.4 – Різниці температур зовнішнього повітря біля поверхні землі  $t_{ЗОВН}$  і неба  $t_O$

$t_{ЗОВН}$ , °С	0	10	20	30	40
$t_O$ , °С	-18	-8	2	11	22
$\Delta t = t_H - t_O$	18	18	18	19	20

Для горизонтальної зовнішньої поверхні радіаційну температуру навколишнього середовища  $t_{RH}$  приймають рівною температурі неба  $t_O$  й відповідно до табл. 3.4:

$$t_{RH} \cong t_O = t_{ЗОВН} - \Delta t = t_{ЗОВН} - 18.$$

Виходячи з рівнянь (3.3), (3.4) і (3.5), можна визначити тепловіддачу для зовнішньої горизонтальної поверхні огороження:

$$\begin{aligned}
 q &= \alpha_K \cdot (t_{ЗОВН} - \tau_{ЗОВН.П}) + \alpha_{ПРОМ} \cdot (t_{RH} - \tau_{ЗОВН.П}) = \\
 &= (\alpha_K + \alpha_{ПРОМ}) \cdot \left[ \left( t_{ЗОВН} - 18 \frac{\alpha_{ПРОМ}}{\alpha_K + \alpha_{ПРОМ}} \right) - \tau_{ЗОВН.П} \right] = \\
 &= \alpha_{ЗОВН} \cdot \left[ \left( t_{ЗОВН} - 18 \frac{\alpha_{ПРОМ}}{\alpha_{ЗОВН}} \right) - \tau_{ЗОВН.П} \right] = \\
 &\quad \alpha_{ЗОВН} \cdot [(t_{ЗОВН} - 3,6) - \tau_{ЗОВН.П}], \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

де  $\alpha_K$ ,  $\alpha_{ПРОМ}$ ,  $\alpha_{ЗОВН}$  – те ж, що й у формулі (3.14);  $t_{ЗОВН}$  – температура зовнішнього повітря для літніх умов, °С;  $t_{ЗОВН.П.}$  – температура зовнішньої поверхні огороження, °С.

У рівнянні (3.17) прийнято  $\alpha_{ПРОМ}/\alpha_{ЗОВН} = 0,2$ , тому що кількість теплоти, яка віддається в літній період, становить приблизно 20% від величини загального теплообміну на поверхні. Вплив неба на теплообмін на горизонтальній поверхні враховується зниженням температури повітря на 3,6 °С. Для вертикальних поверхонь ця величина буде менше, оскільки стіни, як правило, оточені сусідніми будівлями, деревами й т.п.

Коефіцієнт тепловіддачі для літніх умов визначають за виразом, Вт/(м<sup>2</sup> °С)

$$\alpha_{ЗОВН} = 5,81 + 11,6 \cdot \sqrt{w}, \quad (3.18)$$

де перший доданок враховує променисту складову теплообміну на поверхні ( $\alpha_{ПРОМ} = 5,81$  Вт/(м<sup>2</sup> °С)), а другий – конвективну ( $\alpha_K = 11,6 \cdot \sqrt{w}$  Вт/(м<sup>2</sup> °С));  $w$  – є мінімальною із значень середніх швидкостей вітру по румбах за липень, повторюваність яких становить 16 % і більше (але не менше 1 м/с).

У літню пору на процес теплообміну великий вплив має опромінення зовнішніх поверхонь огорожень сонячною радіацією (прямою і розсіяною). При опроміненні частина тепла відбивається, а частина поглинається поверхнею огороження, внаслідок чого підвищується її температура. Цей процес ураховується введенням температурної добавки  $\Delta t_R$ . Тоді в рівнянні (3.15) умовна розрахункова температура зовнішнього повітря дорівнює

$$t_{ЗОВН.УМОВ.} = \alpha_{ЗОВН} \cdot \left( t_{ЗОВН} - 18 \frac{\alpha_{ПРОМ}}{\alpha_{ЗОВН}} \right) + \Delta t_R \cong t_{ЗОВН} + \frac{\rho \cdot q_{СЕР}}{\alpha_{ЗОВН}}, \quad (3.19)$$

де  $\Delta t_R = \frac{\rho \cdot q_{СЕР}}{\alpha_{ЗОВН}}$  – різниця температур, при якій відбувається конвективний теплообмін на поверхні, еквівалентний кількості променистого тепла, що був поглинутий цією поверхнею;  $\rho$  – коефіцієнт поглинання сонячної радіації (визначають за [1]);  $q_{СЕР}$  – середньодобова сонячна радіація, Вт/м<sup>2</sup>,  $\alpha_{ЗОВН}$  – те ж, що й у формулі (3.18).

У рівнянні (3.19) нехтують величиною  $- 18 \frac{\alpha_{ПРОМ}}{\alpha_{ЗОВН}}$ , що враховує вплив радіаційної температури навколишнього середовища  $t_{RH}$ ,

що дає деякий запас надійності при розрахунку перегріву приміщень у літню пору.

## **Опір теплопередачі замкнених повітряних прошарків**

Одним із способів теплоізоляції приміщень є установка в зовнішніх огорожуючих конструкціях (вікнах, стінах, перекриттях) герметичних повітряних прошарків.

Величину потоку теплоти від однієї стінки повітряного прошарку до іншої можна представити як

$$q = q_K + q_{ПРОМ},$$

де  $q_K$  – конвективна складова;  $q_{ПРОМ}$  – промениста складова теплового потоку Вт/м<sup>2</sup>.

Конвективну складову теплового потоку  $q_K$  визначають як

$$q_K = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R},$$

де  $R$  – опір конвективної тепловіддачі або опір теплопровідності (у випадку механічної рівноваги повітря всередині повітряного прошарку),  $\tau_1, \tau_2$  – температури на протилежних поверхнях повітряного прошарку.

Механічна рівновага повітря в повітряному прошарку спостерігається при  $Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta\tau}{\nu^2} < 1000$ .

Мінімальну ширину вертикального повітряного прошарку  $h$ , при якій не спостерігається конвекція, знаходять з виразу

$$h < \sqrt{\frac{1400 \cdot \nu^2}{g \cdot \beta \cdot (\tau_1 - \tau_2)}}, \quad (3.20)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коефіцієнт температурного розширення повітря, °С<sup>-1</sup>;  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с.

При цьому режимі опір теплопередачі прошарку дорівнює

$$R = \frac{l}{\frac{\lambda_{ПОВ}}{h} + \alpha_{ПРОМ}}, \quad (3.21)$$

де  $h$  – ширина повітряного прошарку, м;  $\lambda_{ПОВ}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м °С;  $\alpha_{ПРОМ}$  – коефіцієнт променистого теплообміну, Вт/м<sup>2</sup> °С.

Якщо умова (3.20) не дотримується, у прошарку виникають конвективні потоки, що сходять біля нагрітої й ниспадають біля холодної стінки. При цьому в широких вертикальних прошарках (ширина порівнянна з висотою) взаємодія потоків не відбувається. У тонких прошарках потоки заважають розвитку один одного, виникають контури циркуляції, число й розміри яких залежать від геометрії прошарку.

У цьому разі коефіцієнт конвективного теплообміну  $\alpha_K$  визначають зі співвідношення

$$Nu_X = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (3.22)$$

а опір конвективній тепловіддачі буде рівним

$$R = \frac{1}{\alpha'_K + \alpha''_K},$$

де  $\alpha'_K$  – коефіцієнт тепловіддачі біля холодної поверхні повітряного прошарку,  $\alpha''_K$  – коефіцієнт тепловіддачі біля теплої поверхні повітряного прошарку.

У горизонтальному повітряному прошарку, якщо тепловий потік передається від верхньої нагрітої стінки до нижньої, гравітаційні сили перешкоджають розвитку конвективних потоків. Тому  $\alpha_K$  з достатньою точністю можна визначати за (3.21). Якщо напрямок теплового потоку зворотний (знизу вгору), всередині повітряного прошарку виникають циркуляційні контури, що мають у плані шестигранну форму. У цьому випадку чисельне значення  $\alpha_K$  збільшується в порівнянні зі значенням, встановленим за (3.22). Причому це збільшення не лінійне і залежить від висоти прошарку.

Для променистої складової теплового потоку можна записати

$$q_{ПРОМ} = \alpha_{ПРОМ} \cdot (\tau_1 - \tau_2), \quad q_{ПРОМ} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R},$$

де  $R = \frac{1}{\alpha_{ПРОМ}}$  – опір променистому теплообміну.

Коефіцієнт променистого теплообміну визначають за (3.12). Коефіцієнт опромінення  $\varphi$  для плоских прошарків приймають рівним 1, при перерізі прошарків, близькому до квадратного,  $\varphi = 1,2$ .

Наведений коефіцієнт випромінювання визначають за (3.16) для паралельних поверхонь.

Експериментальні дані опору замкнутих повітряних прошарків наведені в таблиці [1]; [6].

## **Контрольні запитання**

1. Назвіть основні види теплообміну на поверхні огорожуючої конструкції.
2. Дайте визначення процесу теплопровідності, запишіть рівняння теплопровідності для одновимірного стаціонарного і нестаціонарного теплових режимів огороження.
3. Дайте визначення конвективного теплообміну.
4. Розкажіть про механізм і особливості процесу променистого теплообміну.
5. Як визначити опір теплопередачі багат шарової огорожуючої конструкції.
6. Наведіть графічну схему одновимірного температурного поля для багат шарової огорожуючої конструкції.
7. Як залежить зміна температури в шарі матеріалу від його теплопровідності?
8. Який механізм теплообміну в замкнутих повітряних прошарках?

## Лекція 4

# ОПІР ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Метою теплотехнічного розрахунку огороджуючих конструкцій будинків є визначення необхідного рівня теплозахисту будинку, виходячи з його призначення та кліматичних умов району будівництва. При цьому визначають необхідний за санітарно-гігієнічними нормативами опір теплопередачі огороджуючої конструкцій  $R_O^{TP}$ , виходячи з якого обчислюють товщину конструктивного шару огороджуючої конструкції, що одночасно є й теплоізоляційним.

Діючі нормативні значення опору теплопередачі зовнішніх огороджуючих конструкцій, житлових, громадських і цивільних будинків в 2 - 2,3 раза перевищують значення опору теплопередачі, обумовлені санітарно-гігієнічними вимогами. Введення таких нормативів пов'язане з необхідністю зниження енергоспоживання при експлуатації будинків. Близько 30 % виробленої в Україні енергії споживається будівельною галуззю (будівельними організаціями, підприємствами виробництва будівельних матеріалів, енергопостачанням будинків). У зв'язку з цим конструктивні рішення будинків зазнали досить сильних змін, пов'язаних насамперед зі зменшенням енергоспоживання, проведенням ефективної політики енергозбереження. При цьому якщо теплозахист огороджуючих конструкцій відповідає нормативним вимогам, фактичні значення нормативного температурного перепаду  $\Delta t^H$  для зовнішніх огороджуючих конструкцій будинків становлять: для стін -  $1,8 \div 2,6$ ; для горищних перекриттів і безгорищних покриттів -  $1,7 \div 2,1$ ; перекриттів над проїздами й холодними підвалами -  $1,5 \div 1,9$ ; перекриттів над підвалами -  $1,1 \div 1,8$ . Тим самим свідомо забезпечуються необхідні санітарно-гігієнічні норми.

Нормативний опір теплопередачі огороджуючих конструкцій  $R_O^{TP}$  визначають, виходячи з різниці температур - зовнішнього повітря й повітря приміщення. При цьому огороджуючі конструкції повинні мати необхідну теплотривкість - здатність зберігати від-

носну сталість температури при періодичних змінах теплових впливів, однією з характеристик якої є показник теплової інерції.

Цей показник  $D$  характеризує стійкість огорожуючої конструкції до температурних коливань: чим більше теплова інерція огорожуючої конструкції, тим інтенсивніше загасають температурні хвилі. Коли подивитися на чисельні значення температури зовнішнього повітря, наприклад, для Харкова, то абсолютна мінімальна температура становить  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура холодної доби забезпеченістю  $0,98$  складає  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура холодної доби забезпеченістю  $0,92$   $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура холодних трьох діб забезпеченістю  $0,92$  становить  $-25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  і температура холодних п'яти діб забезпеченістю  $0,92$   $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Відповідно, протягом 2 і 8 зим із 100 температура зовнішнього повітря у вказаний період буде опускатися нижче зазначених температур. При цьому система опалення, розрахована на роботу при температурах не нижче температури холодної п'ятиденки, не зможе повністю компенсувати втрати теплоти будівлями, і в цей період буде спостерігатися зниження температури повітря у приміщеннях.

Теплотехнічний розрахунок виконують у припущенні про стаціонарні (сталі) умови передачі теплоти в холодний період року. Подібне припущення, строго кажучи, не зовсім коректне, оскільки більшість процесів, що відбуваються у природі, нестационарні (річні й добові коливання температури зовнішнього повітря, зміна тепловіддачі опалювальних приладів, зміна повітрообміну в приміщенні при роботі систем вентиляції, нарешті, поведінка людей, які прагнуть створити комфортні параметри мікроклімату). У той же час дана передумова виправдує себе практикою будівництва й експлуатації будинків.

При розрахунках необхідного нормативного опору теплопередачі огорожуючих конструкцій  $R_O^{TP}$  треба задатися тепловою інерцією  $D$  і визначити температуру зовнішнього повітря. Для легких безінерційних конструкцій з  $D < 1,5$  як розрахункову зовнішню температуру приймають температуру найбільш холодної доби забезпеченістю  $0,98$ , при  $D$  в діапазоні від  $1,5$  до  $4$  відповідно – температуру найбільш холодної доби забезпеченістю  $0,92$ , якщо  $D = 4 \div 7$  – температуру найбільш холодних трьох діб забезпеченістю  $0,92$ , і, нарешті, якщо  $D > 7$  – температура найбільш холодних п'яти діб забезпеченістю  $0,92$ .



Тобто малоінерційні конструкції повинні бути більш теплими (мати більший опір теплопередачі) у порівнянні з більш інерційними конструкціями, щоб коливання температури не мали помітного впливу на теплову обстановку приміщення. Чим менше час стояння температури зовнішнього повітря, тим менше теплова інерція огороження, оскільки температурні хвилі з малим періодом і більшою амплітудою гасяться більш інтенсивно, ніж хвилі, що мають невелику амплітуду й великий період. Вибір величини теплової інерції залежить також від того, які конструктивні матеріали будуть використовуватися при будівництві. Наприклад, теплосасвоєння конструктивних матеріалів на один, два порядки вище теплосасвоєння теплоізоляційних.

Із введенням нормативного опору теплопередачі для зовнішніх огорожуючих конструкцій житлових і громадських будинків, які забезпечують санітарно-гігієнічні вимоги, відпадає необхідність задаватися тепловою інерцією огороження  $D$  і вибирати розрахункову температуру для визначення  $R_O^{TP}$ .

У цілому сучасні багат шарові огорожуючі конструкції житлових і громадських будинків забезпечують досить ефективно загасання температурних хвиль в них у холодний період року для кліматичних умов України. Якщо розглядати середньодобові коливання температури зовнішнього повітря, то в холодний період року амплітуда їхнього коливання не перевищує  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Цегельна стіна в одну цеглину з утепленням до  $R_O^{TP} = 2,2\text{ м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  і  $D = 4,8$  досить ефективно гасить ці коливання.

Якщо розглянути варіанти утеплення даної конструкції, то виявляється, що більш інтенсивне зниження амплітуди температурної хвилі спостерігається, якщо утеплювач розташований на зовнішній поверхні. Якщо виконати утеплення внутрішньої поверхні, величина загасання температурної хвилі буде в 1,3 раза менше, ніж при зовнішньому утепленні. Що стосується виробничих будівель, встановлення рівня їхнього теплозахисту майже не зазнало змін.

Сказане вище дозволяє зробити наступні висновки:

- сучасний рівень теплозахисту зовнішніх огорожуючих конструкцій житлових, громадських будинків забезпечує такі фактичні значення  $\Delta t_H$ : для стін -  $1,8 \div 2,6$ ; для горищних перекриттів і безгорищних покриттів -  $1,7 \div 2,1$ ; перекриттів над проїздами й холод-

ними підвалами –  $1,5 \div 1,9$ ; перекриттів над підвалами –  $1,1 \div 1,8$ ; забезпечує ефективне загасання середньодобової амплітуди коливання температури зовнішнього повітря;

- при будівництві й реконструкції будинків зовнішнє утеплення доцільніше, бо величина загасання амплітуди коливання температури зовнішнього повітря в 1,3 раза вище, ніж при виконанні внутрішнього утеплення;

- методика розрахунку теплозахисту виробничих будівель у цілому не зазнала змін.

## **Конструктивні елементи зовнішніх огорожуючих конструкцій**

Існують кілька видів огорожуючих конструкцій. Їх можна класифікувати як стінові, покриття й перекриття, світлопрозорі.

Стінові конструкції використовують для огороження приміщень від несприятливих зовнішніх впливів. Вони несуть основне навантаження від перекриттів, меблів, устаткування, людей, власної ваги. Серед стінових конструкцій можна виділити: стінові бетонні панелі; конструкції з монолітного бетону й об'ємноблочні; цегельні, а також конструкції з каменів і дрібних блоків.

Стінові бетонні панелі виготовляють на заводах залізобетонних конструкцій, потім їх доставляють на споруджуваний об'єкт і монтують.

На рис. 4.1 показана тришарова стінова залізобетонна панель із гнучкими й твердими зв'язками. Панель складається з трьох шарів: тонкий зовнішній залізобетонний шар призначений для захисту шару теплоізоляції від атмосферних опадів, шар ефективної теплоізоляції зменшує тепловий потік з приміщення в холодний і запобігає перегріву приміщення в теплий період року; внутрішній залізобетонний шар несе навантаження від власної ваги, перекриттів і т.д.

Теплоізоляційний шар має малу щільність і не може служити сполучною ланкою між зовнішніми залізобетонними шарами. Тому між ними влаштовують зв'язку, що являє собою ребра, що обрамляють, із залізобетону або арматурні стержні, які приварюють до замоноличеної в бетон арматурної сітки (гнучкі зв'язки). Наявність твердих зв'язок істотно погіршує теплозахисні властивості огорожуючих конструкцій, тому що бетон має більш високу теплопро-

відність у порівнянні з матеріалом утеплювача й у місцях, де передбачені тверді зв'язки, утворюються «містки холоду». Для зменшення площі теплопровідних включень конструктивні ребра роблять переривчастими. Такі зв'язки називають дискретними.

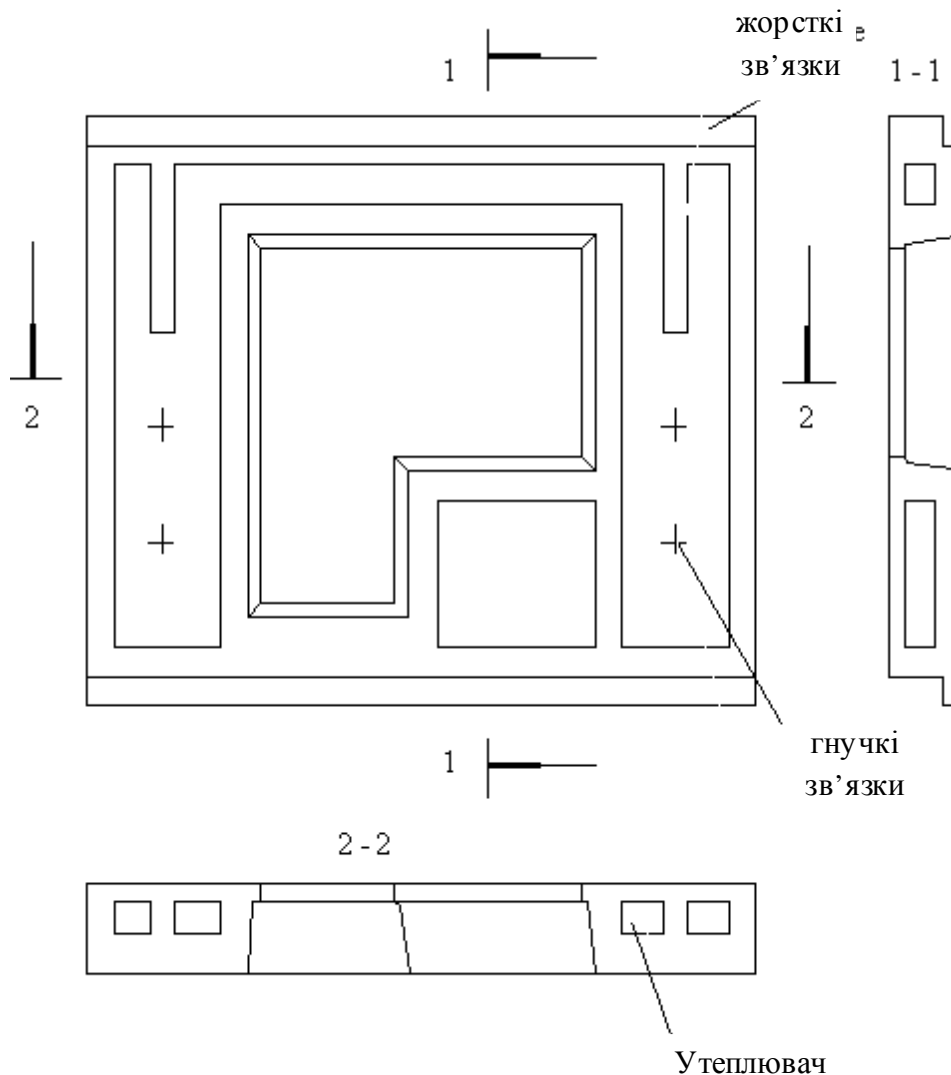
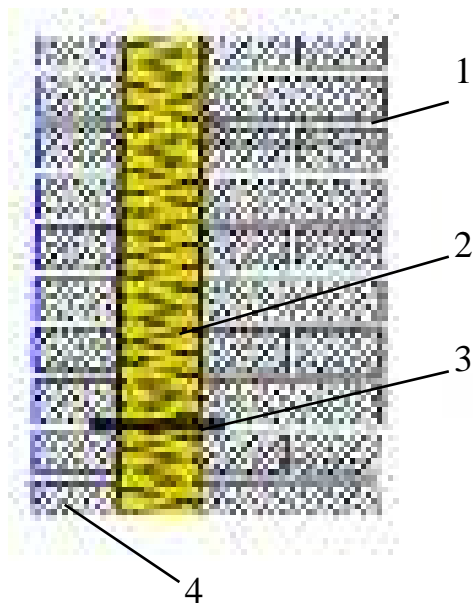


Рис. 4.1 – Схема тришарової стінової огорожуючої конструкції

Гнучкі зв'язки мають меншу площу поперечного перерізу, що набагато зменшує величину зон «містків холоду». Для того, щоб уникнути корозії гнучких зв'язків, їх необхідно виготовляти з нержавіючої сталі або зі звичайних арматур із застосуванням антикорозійних покриттів. Іноді використовують наступний вид гнучких зв'язок: конструктивно їх виконують у вигляді конуса або циліндра, усередині циліндра розташовують сталевий арматурний сержень, простір навколо якого заповнюють бетоном. Це також деякою мірою охороняє метал зв'язки від корозії, хоча знижує теплозахисні властивості конструкції. Подібні зв'язки, залежно від форми бетонного заповнення, називають конічними або циліндричними.

Стінові цегляні конструкції з дрібних блоків виконують із глиняної й силікатної цегли (суцільної та щілинної), із шлакоблоків та ін. товщиною, кратною модулю цегли, наприклад підлога – 1/2, одна – 1, півтори – 1 й 1/2, дві – 2, дві з половиною – 2 й 1/2 цеглини. Кладка може бути суцільною (ложковою, тичковою); криничною.

Як і для бетонних, для сучасних конструкцій характерна наявність ефективного утеплювача й перев'язки зовнішніх захисних і внутрішнього несучих шарів. При використанні криничної кладки стіна складається з двох поздовжніх стінок, що знаходяться одна від одної на відстані 14 – 25 мм, які з'єднують між собою через кожні 65-120 см цегельними ребрами. Простір між стінками заповнюють утеплювачем: мінеральною ватою, газосилікатом, пінополістиролом.



Щоб уникнути усадки утеплювача й утворення порожнеч через кожні 50-100 см влаштовують горизонтальні діафрагми з цементно-піщаного розчину. Тришарова стінова цегельна конструкція з гнучкими зв'язками показана на рис.4.2, 4.3.

Рис. 4.2 – Багатошарова цегельна стіна

- 1 - несучий цегельний шар;
- 2 - шар теплоізоляції;
- 3 - арматурні стержні;
- 4 - зовнішній захисний цегельний шар

Між шарами теплоізоляції й зовнішнім захисним шаром може влаштовуватися повітряний прошарок двох видів: замкнутий повітряний прошарок служить додатковим теплозахистом, вентиляований зовнішнім повітрям для осушування шару теплоізоляції та запобігання зволоженню в результаті термічної конденсації вологи всередині огорожуючої конструкції. Такий повітряний прошарок виконують, як правило, висотою, рівною висоті поверху, і сполучають із зовнішнім повітрям через продухи (рис 4.4).

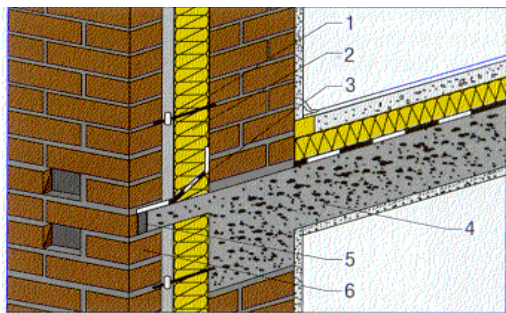


Рис. 4.4 – Цегельна стіна з повітряним прошарком:

- 1 - гнучкий зв'язок;
- 2 - утеплювач;
- 3 - фартух з фольги;
- 4 - плита перекриття;
- 5 - теплоізоляція;
- 6 - утеплювач

нок, а яку-небудь його частину. Перевагами такого способу утеплення є відносно низька вартість проведення робіт, тому що немає необхідності у використанні будівельного риштування. Однак при цьому через збільшення товщини стіни потрібно змішувати трубопроводи й опалювальні прилади вглиб приміщення, переміщувати електропроводку, розташовану в зовнішній стіні. Корисна площа

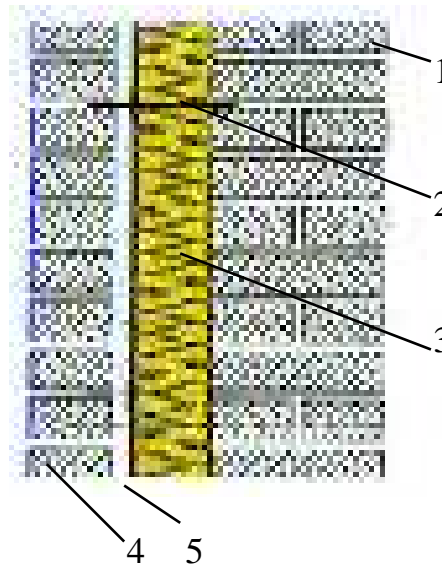


Рис. 4.3 – Багатошарова цегельна стіна

- 1 - несучий цегельний шар;
- 2 - арматурні стержні;
- 3 - шар теплоізоляції;
- 4 - зовнішній захисний цегельний шар;
- 5 - повітряний прошарок

Крім будівництва нових будинків важливою залишається реконструкція старих будівель, у процесі якої необхідно утеплювати існуючі огорожуючі конструкції.

Можливі два варіанти утеплення – зовнішнє й внутрішнє. Внутрішнє утеплення застосовують, коли будинки являють собою пам'ятники архітектури або якщо треба утеплювати не весь будинок, а яку-небудь його частину.

Перевагами такого способу утеплення є відносно низька вартість проведення робіт, тому що немає необхідності у використанні будівельного риштування. Однак при цьому через збільшення товщини стіни потрібно змішувати трубопроводи й опалювальні прилади вглиб приміщення, переміщувати електропроводку, розташовану в зовнішній стіні. Корисна площа

приміщення зменшується, в конструкції може відбуватися термічна конденсація вологи.

Тому у всіх інших випадках доцільніше застосовувати зовнішнє утеплення. У цьому варіанті несучий шар виявляється в зоні позитивних температур, що запобігає термічній конденсації вологи всередині огорожжувачої конструкції.

У даному варіанті утеплення до несучої стіни, очищеної від штукатурки, кріпиться каркас (дерев'яний або металевий), в якому розміщують теплоізоляційні мати або плити. Після цього до каркаса кріпиться зовнішній захисний шар, як показано на рис 4.5.

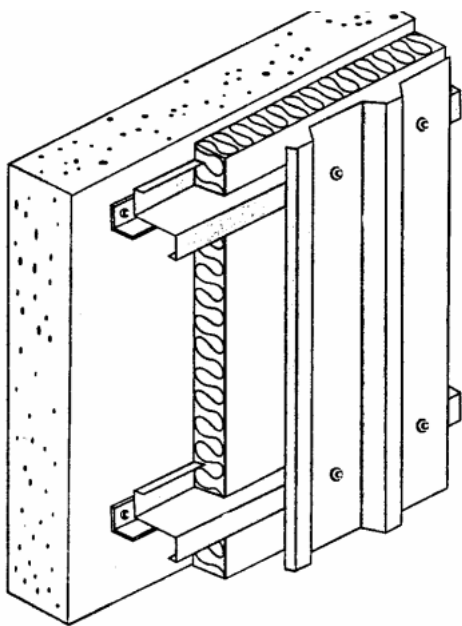


Рис. 4.5 – Варіант зовнішнього утеплення

Якщо використовувати жорстку теплоізоляцію, можна обійтися без каркаса. Теплоізоляційні плити приклеюють до стіни, що утеплюється, спеціальними сполуками або прикручують шурупами. Після цього наносять захисний шар з вологостійких гіпсокартонних облицювальних листів, ламінованих деревних плит, керамічної плитки, облицювального каменя. На рис 4.6 показане утеплення бетонної стіни з виконанням повітряного прошарку. Як зовнішній шар використовують цегляну кладку в половину цеглини.

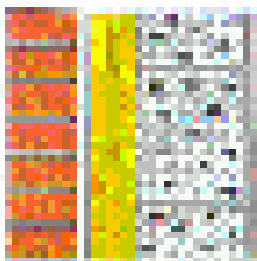


Рис. 4.6 – Утеплення бетонної стіни

Аналогічно конструкції зовнішнього утеплення виконують внутрішнє утеплення стін.

Конструкції перекриттів горищ також виконують багат шаровими. Як теплова ізоляція можуть застосовуватися м'які мати, тверді й напівтверді плити. Застосування останніх доцільніше через можливість нанесення дефектів при утепленні перекриття.

Конструкція бездахового покриття багато в чому аналогічна конструкції горищних перекриттів. Але тут необхідно передбачати захист конструкції від термічної конденсації вологи (вентильовані повітряні прошарки), від атмосферної вологи (гідроізоляційні шари, заходи для відведення води).

Для конструкцій підвальних перекриттів також характерна наявність багатошаровості. Шари, що мають більшу щільність (залізобетонні панелі суцільні й пустотілі, настил по балках), необхідні для передачі навантажень від людей, меблів, устаткування на стіни; теплоізоляційні шари, що мають малу щільність, зменшують тепловий потік, який йде ззовні. При цьому теплоізоляційні шари, які мають більшу щільність, укладають поверх перекриття, що мають меншу щільність, кріплять до конструкції перекриття знизу.

Як світлопрозорі огорожуючі конструкції широке застосування отримали конструкції вікон із застосуванням склопакетів. Склопакет являє собою два скла, по краю яких (між ними) прокладена алюмінієва рамка, що приклеюються до стекол. Залежно від ширини рамки відстань між стеклами в різних склопакетах може бути 8, 10, 16, 24 мм. Повітряний простір у склопакеті герметично, крім повітря, може бути заповнений вуглекислим газом, важкими інертними газами.

Склопакет вміщується в конструкцію переплетення, що, у свою чергу, кріпиться до віконної коробки.

Залежно від матеріалу віконні переплетення та коробки бувають дерев'яними, алюмінієвими, пластмасовими (рис. 4.7). Алюмінієві й пластмасові переплетення і коробки виконують багатокамерними, що дає змогу збільшити теплозахисні якості віконних конструкцій.

Наведений вище далеко не повний огляд сучасних огорожуючих конструкцій свідчить, що основною тенденцією в будівництві є застосування багатошарових огорожуючих конструкцій з різними варіантами перев'язки конструктивних шарів.

Перев'язку шарів виконують, як правило, з міцних й високотеплопровідних матеріалів, таких як сталь, бетон, цегла. Оскільки матеріал перев'язки високотеплопровідний, у цих місцях утворюються «містки холоду», що знижує теплозахисні якості огороження, сприяє термічній конденсації вологи. Із цими явищами необхідно боротися, використовуючи новітні досягнення науки й техніки в області будівельних матеріалів, сучасні методики розрахунку й проектування огорожуючих конструкцій.

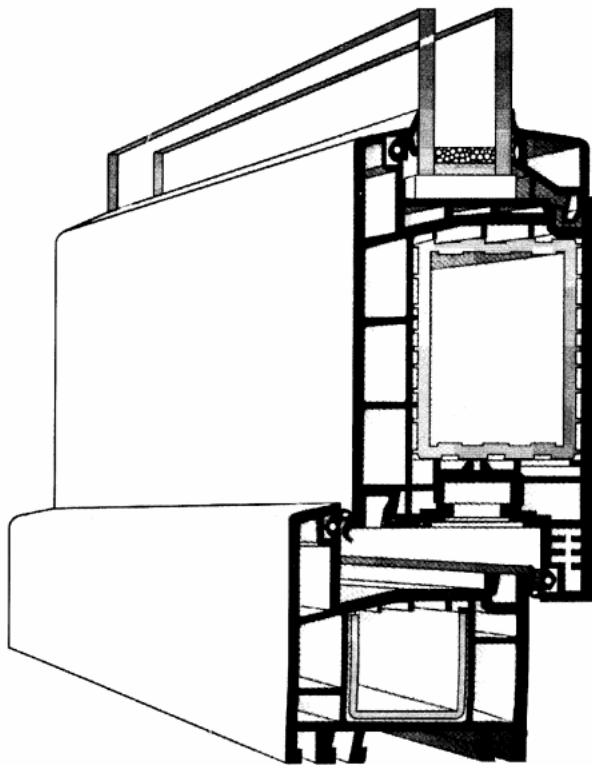


Рис. 4.7 – Конструкція вікна

## **Вибір економічно доцільного рівня теплозахисту зовнішніх огорожуючих конструкцій**

У будівництві, як і у всій індустрії, зберігається тенденція до зниження кількості споживаної енергії будинками й спорудами. При цьому треба вирішувати питання про економічно доцільну величину теплозахисту й потрібну потужність системи опалення. Чим вище рівень теплозахисту будинку, тим нижче потрібна потужність системи опалення й тим менше теплової енергії буде споживатися будинком.

Визначення економічно доцільного рівня теплозахисту будинку є складним завданням. Для його вирішення існують різні методики, засновані на визначенні величини приведених витрат. Методика вибору оптимального рішення полягає в наступному.

Для розглядуваної системи (об'єкта) визначають основні параметри роботи, відповідно до яких підбирають складові елементи й встановлюють величину приведених витрат. Потім задаються но-



вими параметрами, знову підбирають елементи системи й визначають величини приведених витрат. Після проведення ряду розрахунків обирають той варіант об'єкта або системи, для якого приведені витрати мінімальні.

Таким чином, головною характеристикою, що визначає ефективність конструктивного або технічного рішення з економічної точки зору, є величина приведених витрат. При цьому можуть визначатися різні за своєю формою приведені витрати: економічні, енергетичні, ексергетичні. Методика визначення ексергетичних приведених витрат останнім часом набуває найбільшого поширення.

У 60-х роках 20 ст. М. Штрабус розробив новий напрямок моделювання складних енергетичних систем, який враховує термодинамічні й економічні фактори, - термoeкономіку. Можливості термoeкономічного методу значно ширші, ніж можливості техніко-економічного. Введення витрат ексергії як нової узагальненої характеристики дозволяє забезпечити адитивність всіх параметрів роботи термодинамічної системи, проаналізувати величини витрат ексергії за рахунок недосконалості обладнання й знайти оптимум між витратами на обладнання та втратами ексергії в системі.

Завданням термoeкономічної оптимізації є визначення опору теплопередачі зовнішніх огорожуючих конструкцій з теплопровідними включеннями, при якому витрати на одержання корисного ефекту (комфортної обстановки в приміщенні) були б мінімальними. Рішення наведені у [5].

## **Контрольні запитання**

1. Яка роль теплофізики у вирішенні основної енергетичної проблеми в будівництві?
2. Наведіть основні способи теплоізоляції огорожуючих конструкцій.
3. Наведіть основні критерії вибору оптимальної величини опору теплопередачі огорожуючих конструкцій.
4. Які основні методи вибору оптимальної величини опору теплопередачі огорожуючих конструкцій?
5. Назвіть основні завдання теплового проектування огорожуючих конструкцій.

## **Лекція 5**

# **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ДЕЯКИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

### **Опір теплопередачі світлопрозорих огорожувачих конструкцій**

Світлопрозорі огорожувачі конструкції у будівлі призначені для природного освітлення приміщень. Вони мають найменше значення опору теплопередачі, тому справляють великий вплив на тепловий режим приміщення.

Залежно від архітектурного рішення, призначення будівлі й орієнтації її стін вікна можуть мати різну форму й розміри. Відповідно переплетення світлопрозорих конструкцій бувають дерев'яні, пластикові, алюмінієві, сталеві, а кількість стекол у них може коливатися від одного до чотирьох. Чим більше стекол, тим більше у світлопрозорій конструкції повітряних прошарків, тим вище її опір теплопередачі. Кріплення стекол до переплетення проводять за допомогою штапиків, які виконують з того ж матеріалу, що й переплетення вікна, іноді – за допомогою прокладок з губчатої гуми. Для провітрювання приміщень у вікнах влаштовують стулки, що відчиняються.

На відміну від суцільних, у світлопрозорих огорожувачих конструкціях має місце складний теплообмін: теплота передається теплопровідністю, конвекцією й випромінюванням. У твердих елементах вікон тепло передається шляхом теплопровідності, в міжскляному просторі та із зовнішньої і внутрішньої поверхні конструкції – теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням залежно від інтенсивності теплового потоку.

При виборі типу заповнень світлових прорізів при будівництві нових і реконструкції старих будинків потрібне виконання умови

$$R_O^{ПOT} \geq R_O, \quad (5.1)$$

де  $R_O^{ПОТ}$  – опір теплопередачі світлопрозорих огорожуючих конструкцій, який можна знайти за табл. Г.1 додатку Г для житлових і громадських будинків і за табл. Б. 4 залежно від призначення приміщення та різниці температури внутрішнього повітря і середньої температури найбільш холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,92 для виробничих будівель;  $R_O$  – опір теплопередачі світлопрозорих огорожуючих конструкцій, прийнятий залежно від їх вигляду за [1].

При проектуванні світлопрозорих огорожуючих конструкцій, опір теплопередачі визначають за формулою

$$R_O = R_{ВН} + \sum R_I + \sum R_{ПОВ.П} + R_{ЗОВН}, \quad (5.2)$$

де  $R_{ВН}$  – опір теплопередачі на внутрішній поверхні огорожуючої конструкції,  $(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{ЗОВН}$  – опір теплопередачі на зовнішній поверхні огорожуючої конструкції,  $(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_I$  – сума термічних опорів теплопровідності стекол,  $(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , що визначаються за залежностями, наведеними в розділі 2;  $\sum R_{ПОВ.П}$  – сума термічних опорів повітряних прошарків, що знаходяться між стеклами,  $(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Оскільки світлопрозорі огорожуючі конструкції є малоінерційними, їхній тепловий розрахунок проводиться для сталого потоку теплоти. Конструкцію розбивають за висотою на ділянки, для кожної з яких записують рівняння тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні конструкції: рівняння переносу тепла теплопровідністю для стекол, рівняння тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні повітряного прошарку, рівняння теплообміну випромінюванням. Із цих рівнянь знаходять опір теплопередачі огорожуючої конструкції.

Рівняння тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні конструкції

$$q = \alpha_{ВН} \cdot (t_{ВН} - \tau_{ВН1}) \quad q = \alpha_{ЗОВН} \cdot (\tau_{ЗОВН N} - t_{ЗОВН N}), \quad (5.3)$$

де  $\tau_{ВН1}$  – температура внутрішньої поверхні першого скла; індекс 1, ..., N – позначає номер скла у вікні щодо внутрішньої поверхні приміщення;  $\tau_{ЗОВН N}$  – температура зовнішньої поверхні останнього скла.

Значення коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні світлопрозорої конструкції розраховують за розділом 3. Опір теплопровідності скла

$$R_I = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (5.4)$$

Передача теплоти усередині повітряного прошарку (між стеклами) має ряд особливостей. При малому градієнті температури в повітряному прошарку або малій її товщині  $h$  спостерігається механічна рівновага повітря. Мінімальна відстань між стеклами, при якій не будуть утворюватися конвективні потоки повітря

$$h \leq \sqrt[3]{\frac{1400 \cdot \nu^2}{g \cdot b \cdot (\tau_{ВН1} - \tau_{ЗОВН2})}}, \quad (5.5)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, Па с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $b$  – коефіцієнт температурного розширення повітря, град<sup>-1</sup>.

При цьому з достатнім ступенем точності опір повітряного прошарку визначають за рівнянням

$$R_{ПОВ.П} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{l}{\alpha_{ПРОМ}}, \quad (5.6)$$

де  $\alpha_{ПРОМ}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, що визначається за формулою (3.10) залежно від температури на поверхні стекол.

При збільшенні градієнта температури біля зовнішньої поверхні внутрішнього скла утворюється висхідний конвективний потік, а у внутрішньої поверхні зовнішнього скла – спадний (рис. 5.1). Якщо ширина повітряного прошарку велика, а градієнт температур малий, конвективні потоки повітря не заважають один одному і в повітряному прошарку має місце вільна конвекція (рис. 5.1, а)  $\delta_X + \delta_T < h$  де  $\delta_X$ ,  $\delta_T$  – товщина прикордонного шару, відповідно, холодного й теплового конвективного потоку, м;  $h$  – загальна товщина повітряного прошарку, м.

У цьому випадку температура повітря усередині повітряного прошарку постійна за висотою і визначається за формулою

$$t_{ПОВ.П} = \frac{\tau_{ВН1} + \tau_{ЗОВН2}}{2}. \quad (5.7)$$

Значення товщин прикордонних шарів біля теплої  $\delta_T$  й холодної  $\delta_X$  поверхні повітряного прошарку для ламінарного режиму можна розрахувати за рівнянням

$$\delta_T = \frac{6,164 \cdot x}{\sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot x^3 \cdot (\tau_{ВН1} - t_{ПОВ.П})}{\nu^2}}}, \quad (5.8)$$

де  $x$  – відстань від низу повітряного прошарку, м;

$$\delta_X = \frac{6,164 \cdot (H - x)}{\sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot (H - x)^3 \cdot (t_{\text{ПОВ.П}} - \tau_{\text{ЗОВН2}})}{\nu^2}}}, \quad (5.9)$$

де  $H$  – висота повітряного прошарку, м;

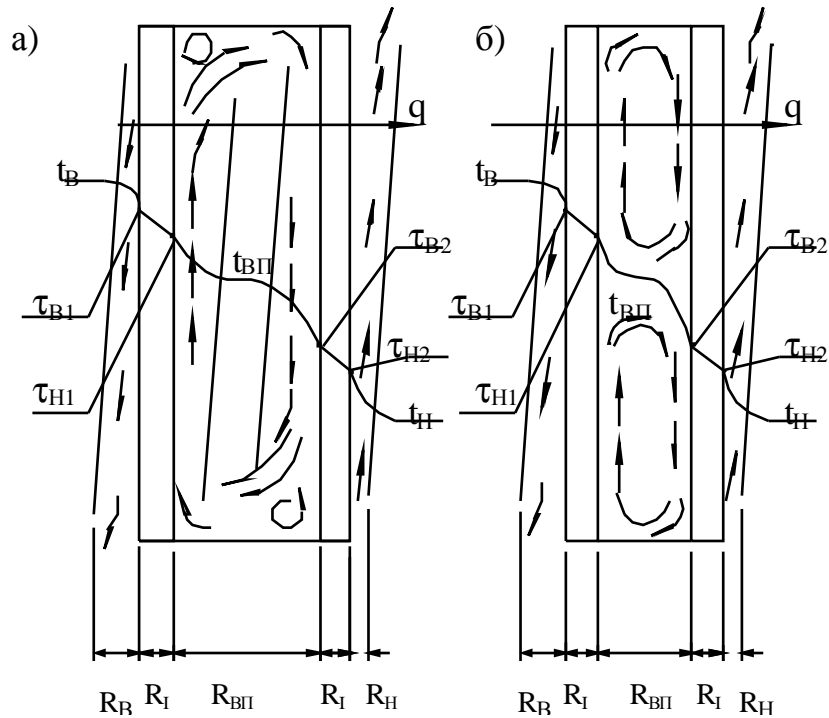


Рис. 5.1 – Схема розвитку конвективних потоків повітря всередині повітряного прошарку

При значенні критерію Грасгофа  $> 10^7$  ламінарний режим конвекції переходить у турбулентний, для якого  $\delta_T$  й  $\delta_X$  будуть рівні

$$\delta_T = \frac{4,28 \cdot x}{\sqrt[6]{\frac{g \cdot \beta \cdot x^3 \cdot (\tau_{\text{ВН1}} - t_{\text{ПОВ.П}})}{\nu^2}}}, \quad (5.10)$$

$$\delta_X = \frac{4,28 \cdot (H - x)}{\sqrt[6]{\frac{g \cdot \beta \cdot (H - x)^3 \cdot (t_{\text{ПОВ.П}} - \tau_{\text{ЗОВН2}})}{\nu^2}}}. \quad (5.11)$$

Локальні значення коефіцієнта тепловіддачі знаходять на підставі рівнянь: для ламінарного режиму руху повітря

$$\alpha_K = 0,414 \cdot \lambda \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot (\tau_{ЗОВН1} - t_{ПОВ.П})}{x \cdot \nu^2}}, \quad (5.12)$$

для турбулентного режиму

$$\alpha_K = 0,14 \cdot \lambda \cdot \sqrt[6]{\frac{g \cdot \beta \cdot (\tau_{ЗОВН1} - t_{ПОВ.П})}{\nu^2}}. \quad (5.13)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням  $\alpha_{ПРОМ}$  знаходять за формулою (3.12) залежно від температур на поверхні стекол.

Якщо температурний градієнт великий або ширина повітряного прошарку мала, конвективні потоки повітря взаємодіють один з одним, утворюючи замкнуті циркуляційні кола по висоті повітряного прошарку (рис. 7.1 б). У цьому разі рівняння (5.7) не придатне і температура в ядрі прошарку визначається як

$$t_{ПОВ.П} = \tau_{ВН1} - (\tau_{ВН1} - \tau_{ЗОВН2}) \cdot \left(0,83 - \frac{0,6 \cdot x}{H}\right). \quad (5.14)$$

Локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі знаходять з рівнянь: для ламінарного режиму руху повітря

$$\alpha_K = 0,47 \cdot ((\tau_{ЗОВН1} - t_{ПОВ.П})/x)^{0,25}, \quad (5.15)$$

для турбулентного режиму

$$\alpha_K = 1,512 \cdot (\tau_{ЗОВН1} - t_{ПОВ.П})^{0,3} \cdot x^{-0,1}. \quad (5.16)$$

Опір теплопередачі повітряного прошарку в цьому випадку дорівнює

$$R_{ПОВ.П} = \frac{1}{\alpha_{КХ} (\tau_{ЗОВН1} - \tau_{ВН2}) + \alpha_{КТ} \cdot (\tau_{ЗОВН1} - t_{ПОВ.П}) + \alpha_{ПРОМ} \cdot (\tau_{ЗОВН1} - \tau_{ВН2})}, \quad (5.17)$$

де  $\alpha_{КХ}$  й  $\alpha_{КТ}$  – коефіцієнти тепловіддачі конвекцією відповідно на холодній і теплій стороні повітряного прошарку.

При розрахунку товщин конвективних шарів у повітряному прошарку спочатку необхідно задати значення температур на поверхні стекол  $\tau$  і в ядрі повітряного прошарку  $t_{ПОВ.П}$ . За цими даними розраховують опір теплопередачі світлопрозорої конструкції, потім уточнюють температури й за формулою (5.2) знову розраховують опір теплопередачі. Розрахунки проводять доти, поки різниця значень  $R_0$ ,  $t_{ПОВ.П}$ , у двох послідовних наближеннях не стане менше 10 – 15 %.

## Опір теплопередачі конструкції підлоги

Ноги людини чутливі до перегріву й переохолодження поверхні підлоги й до холодних струмів повітря уздовж нього. Гігієністи рекомендують у зимовий період підтримувати температуру поверхні підлоги не нижче температури повітря в приміщенні на 2 - 2,5 °С, і не охолоджувати підлогу влітку.

Теплове відчуття людини й втрати теплоти ногами залежать не тільки від температури, але й від теплофізичних властивостей матеріалу покриття.

Методика розрахунку опору теплопередачі залежить від конструкції підлоги. Якщо в будинку є підвал, то перекриття між першим поверхом і підвалом розраховують як стінову огорожуючу конструкцію за методикою, викладеною вище.

Якщо підлога виконана на ґрунті або на лагах, то застосовують спрощену методику розрахунку коефіцієнта опору теплопередачі підлоги (оскільки в загальному тепловому балансі приміщення частка теплового потоку через підлогу порівняно не велика). Відповідно до цієї методики всю площу підлоги першого поверху умовно розбивають на чотири зони: ширина перших трьох дорівнює 2 м, кожна (усього 6 м) уздовж зовнішніх стін, а четверта зона займає всю площу підлоги, що залишилася. Коефіцієнти опору теплопередачі не утепленої підлоги на ґрунті  $R_{H.П.} = 2,1; 4,3; 8,6; 14,2$  (м<sup>2</sup>°С)/Вт (значення наведені послідовно для кожної зони з 1 по 4). Якщо в конструкції підлоги передбачені додаткові утеплюючі шари опір теплопередачі по зонах розраховують за формулою. Утеплювачем вважається матеріал з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  менше 1,2 Вт/(м°С)

$$R_{У.П.} = R_{H.П.} + \sum_{i=1}^N \frac{\delta_{У.Ш.і}}{\lambda_{У.Ш.і}}, \quad (5.18)$$

де  $\delta_{У.Ш.і}$ ,  $\lambda_{У.Ш.і}$  – товщина й коефіцієнт теплопровідності шарів утеплювача.

Розрахунок опору теплопередачі підлоги на лагах також проводять по зонах:

$$R_{У.П.} = 1,18 \cdot \left( R_{H.П.} + \sum_{i=1}^N \frac{\delta_{У.Ш.і}}{\lambda_{У.Ш.і}} \right). \quad (5.19)$$



**Теплозасвоєння поверхні підлоги.** Розрахунок теплозасвоєння підлоги полягає у визначенні коефіцієнта теплозасвоєння поверхні підлоги конструкції, що розраховується,  $Y_{\Pi}$  і порівнянні його з нормативною величиною  $Y_{\Pi}^H$ , яка визначається за [1]. Значення показників теплозасвоєння поверхні підлоги (нормативна величина) наведені у [1] і [5]. Якщо дотримується умова  $Y_{\Pi} < Y_{\Pi}^H$ , то дана підлога задовольняє вимогам теплозасвоєння. Якщо  $Y_{\Pi} > Y_{\Pi}^H$ , слід вибрати іншу конструкцію підлоги або змінити товщину деяких його шарів.

Розрахунок теплозасвоєння поверхні підлоги виконують згідно з розділом 4.

Значення коефіцієнта теплозасвоєння поверхні підлоги  $Y_{\Pi}$  визначають послідовно від шару до шару конструкції в напрямку, зворотному руху температурної хвилі. Причому розраховують тільки ті шари огороження, які перебувають у зоні різких коливань температури, оскільки тільки вони впливають на коефіцієнт теплостійкості поверхні підлоги. Тому розрахунок починається з визначення межі шару різких коливань у підлозі, для якого справедливо  $D = 1$ . Розглядають дві умови:

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{K-1} < 1, \quad (5.20)$$

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{K-1} + D_{K-1} \geq 1, \quad (5.21)$$

де  $K$  – число тих шарів конструкції підлоги, які в сумі дають  $D \geq 1$ ; це значить, що межа шару різких коливань проходить десь у шарі  $K$ .

При визначенні теплової інерції кожного шару ( $D_1, D_2$  і т.д.) коефіцієнти теплозасвоєння матеріалів  $S_1, S_2, \dots$ , що входять у вираз  $D = R \cdot S$ , приймають для періоду коливань  $Z = 24$  години.

До теплозасвоєння поверхні підлоги ставляться підвищені вимоги. Тому період коливання теплового потоку для конструкції підлоги умовно приймають рівним 6 годин замість 24. Це дозволяє розрахувати конструкцію, що забезпечить більш інтенсивне загасання температурної хвилі в товщі підлоги, оскільки зі зменшенням періоду коливань зменшується довжина хвилі й відповідно товщина шару різких коливань.

При прийнятому періоді  $Z = 6$  годин необхідно перерахувати  $S_{24}$  на  $S_6$  за формулою (4.10).

$$D_1 = R_1 \cdot S_{1(6)} = R_1 \cdot 2 \cdot S_{1(24)}, \quad D_2 = R_2 \cdot S_{2(6)} = R_2 \cdot 2 \cdot S_{2(24)} \text{ і т.д.} \quad (5.22)$$

З урахуванням рівності (7.22) вираз (7.21) набуває вигляду

$$2 \cdot (R_1 \cdot S_{1(24)} + R_2 \cdot S_{2(24)} + R_3 \cdot S_{3(24)} + \dots + R_K \cdot S_{K(24)}) \geq 1 \quad \text{або}$$

$$R_1 \cdot S_{1(24)} + R_2 \cdot S_{2(24)} + R_3 \cdot S_{3(24)} + \dots + R_K \cdot S_{K(24)} \geq 0,5, \quad (5.23)$$

де величину 0,5 одержуємо як результат перерахування значень коефіцієнта  $S$  з 24-годинного періоду коливань на 6-годинний, а не як нормоване значення показника теплової інерції  $D$  шару різких коливань для підлоги.

## Опір теплопередачі стиків зовнішніх стінних панелей

Стики зовнішніх стінних панелей у збірних будинках можуть бути причиною підвищених теплових втрат. Через неточність при монтажі або дефектах панелей стики іноді виявляються більшими за величиною, ніж запроектовано.

Приведений опір теплопередачі стикових з'єднань, як правило, значно нижче опору теплопередачі гладі огорожуючої конструкції, бо стикове з'єднання містить теплопровідні вclusions. У цьому місці огорожуючої конструкції температурні поля помітно викривляються (рис. 5.2).

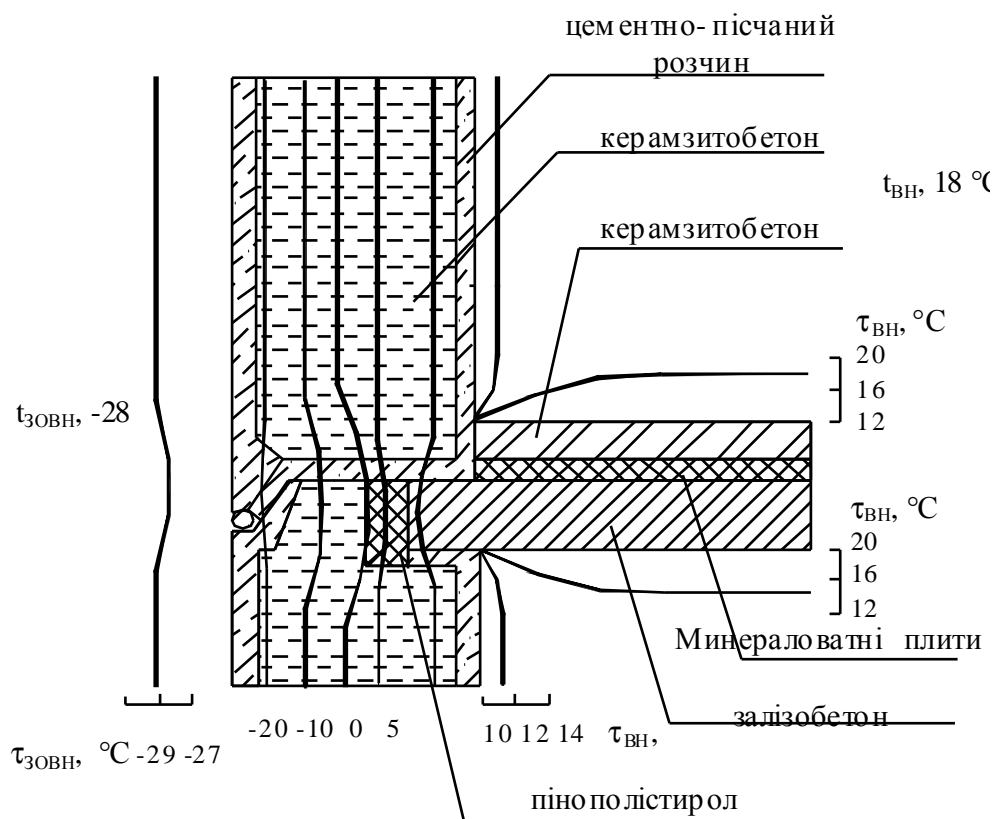


Рис. 5.2 – Схема стикового з'єднання

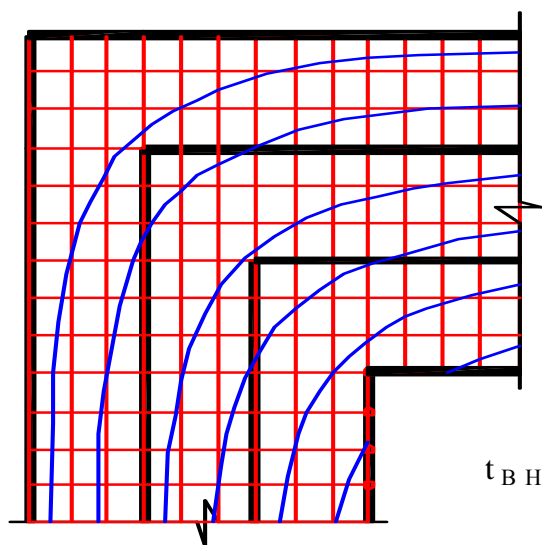
При розрахунках опору теплопередачі треба враховувати, що величина коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній поверхні значно нижче в порівнянні з величиною коефіцієнта тепловіддачі для поверхні стіни в результаті зменшення інтенсивності конвекційних потоків повітря й зменшення передачі тепла випромінюванням. Приведений опір теплопередачі даного вузла будинку можна визначити, моделюючи процеси теплообміну, що протікають у ньому, шляхом розрахунку температурних полів [5].

### Опір теплопередачі зони зовнішнього кута будинку (сполучення стін)

Опір теплопередачі стику двох стін будинку в зоні зовнішнього кута (рис. 5.3) значно менше опору теплопередачі плоскої конструкції. У результаті того, що площа теплосприймаючої поверхні стін з боку приміщення значно менше площі тепловіддаючої поверхні зовні, температурне поле в цій частині огородження викривляється. Крім цього, в результаті того, що дві стіни примикають одна до одної, утворюється застійна зона повітря, що заважає розвитку конвективних потоків. Знижується також інтенсивність променистого теплообміну.

На рис. 5.3 показане температурне поле в зоні зовнішнього кута. У результаті скривлення ізотерм температура на внутрішній поверхні стін у цій зоні значно знижується в порівнянні з гладкою конструкцією. При зниженні температури нижче точки роси в найбільш холодні періоди

$t_{\text{зовн}}$



зим на поверхні стін у зоні зовнішнього кута буде конденсуватися волога, розвиватися грибки й цвіль.

Підвищена вологість матеріалу приводить до збільшення коефіцієнта теплопровідності, зростання втрат теплоти, можливості руйнування конструкції в результаті

Рис 5.3 – Спряження двох стін будівлі в зоні зовнішнього кута

замерзання – танення вологи в порах матеріалу.

Оскільки аналітичний розв’язок крайової задачі теплопереносу в зоні зовнішнього кута поки що відсутній, при проведенні розрахунків опору теплопередачі даного вузла доцільно використовувати методики розрахунку температурних полів, із застосуванням методів математичного моделювання й ідентифікації, наведені у параграфі 2.3 [5].

## **Контрольні запитання**

1. Охарактеризуйте огорожуючі конструкції будинків.
2. Дайте визначення й поясніть фізичний зміст опору теплопередачі огорожуючої конструкції.
3. Опишіть механізм теплообміну в замкнутих повітряних прошарках.
4. Які особливості теплопереносу в зонах стиків зовнішніх стінних панелей і кутів будинків?

## **Лекція 6**

# **ТЕПЛОСТІЙКІСТЬ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **Теплозасвоєння поверхонь огородження**

Більшість процесів, що відбуваються у природі, нестаціонарні, тобто не постійні в часі. Наприклад, змінюються в часі такі параметри клімату, як температура, вологість, швидкість повітря, кількість опадів.

Якщо говорити про зміну температури, то в першу чергу можна говорити про температурні коливання. Коливання температури можуть бути річними: температура змінюється від мінімуму взимку, до максимуму влітку; добовими: у результаті дії сонячної радіації (прямої та розсіяної) вдень температура повітря підвищується, вночі знижується.

У результаті коливань температури повітря навколо свого середнього значення змінюється температура поверхні огородження і теплові потоки, що через неї проходять.

При коливаннях температури і теплових потоків у повітрі, яке омиває поверхню огородження, виникає температурна хвиля, що, поступово загасаючи, проходить до іншої поверхні, яка межує із середовищем з майже постійною температурою.

Властивість огородження протистояти змінам температури й теплових потоків, зменшуючи амплітуду коливання температури за товщиною конструкції, називається теплостійкістю.

Для характеристики теплостійкості введений коефіцієнт загасання розрахункової амплітуди коливання температури в огородженні –  $\nu$ . Значення його залежить від інерції огородження  $D$ , коефіцієнтів теплозасвоєння – поверхні огородження  $Y$  і матеріалу  $S$ , а також умов теплообміну на поверхні огородження ( $\alpha_{\text{зовн}}$  і  $\alpha_{\text{вн}}$ ).

Теплозасвоєння – це властивість огородження сприймати або віддавати теплоту при коливаннях температур повітря і теплових потоків (періодичність включення опалювальних приладів, сонячної радіації, добові зміни температури зовнішнього повітря та ін.).

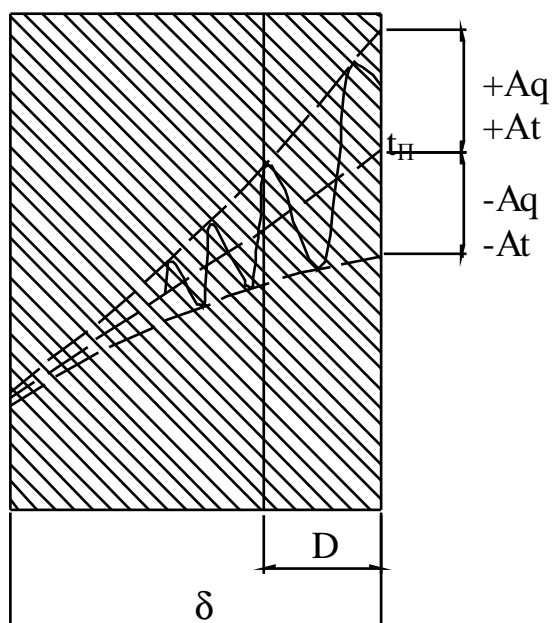


Рис. 6.1 – Коливання значень теплового потоку й температури

(часу, за який температура однаковим чином повторюється) і теплотехнічних властивостей самого огороження. Це значить, що при однакових коливаннях температури на поверхні огороження з різних матеріалів сприймають різну кількість теплоти, оскільки мають різне теплозасвоєння.

Коефіцієнт теплозасвоєння поверхні  $Y$  – відношення амплітуди коливання теплового потоку  $A_q$  до амплітуди коливання температури на поверхні огороження.

$$Y = \frac{A_q}{A_t}, \quad (6.1)$$

де  $Y$  має розмірність  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ,  $A_t$  –  $^\circ\text{C}$ , залежить від величини  $A_q$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Коефіцієнт теплозасвоєння  $Y$  характеризує щільність отриманого поверхнею теплового потоку  $\text{Вт}/\text{м}^2$  при зміні її температури на  $1^\circ\text{C}$  і залежить від теплотехнічних властивостей матеріалу огороження, періоду коливання теплового потоку  $Z$ , умов теплообміну на поверхні ( $\alpha_{\text{зовн}}$  і  $\alpha_{\text{вн}}$ ).

## Теплова інерція огорожень

Коливання температури на поверхні огороження викликають, у свою чергу, коливання температури в товщі огороження. У міру віддалення від поверхні амплітуда коливання температури буде

Гармонічні коливання температури та теплового потоку на поверхні огороження можуть бути подані у вигляді синусоїд або косинусоїд (рис 6.1), де схематично показані коливання значень теплового потоку за розрахунковий період часу  $Z$  годин;

$t_{\text{п}}$  – середня температура поверхні;  $A_q$  й  $A_t$  – амплітуда коливання теплового потоку і температури.

Амплітуда коливання температури на поверхні  $A_t$  залежить від величини  $A_q$ , періоду  $Z$

зменшуватися і спізнюватися, а може зовсім не викликати зміни температури на протилежній поверхні конструкції (рис 6.1).

Інтенсивність загасання температурної хвилі залежить від інерційних властивостей матеріалу огороження, характеристикою яких є величина  $D$  – **теплова інерція огороження**. Для однорідної стіни ця величина дорівнює добутку термічного опору  $R = \delta/\lambda$  на коефіцієнт  $S$ :

$$D = R \cdot S = \frac{\delta}{\lambda} \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}{Z}} = 2 \cdot \pi \sqrt{2} \cdot \frac{\delta}{\Lambda} = 8,9 \cdot \frac{\delta}{\Lambda}, \quad (6.2)$$

де  $\delta$  – товщина огороження, м;  $\Lambda$  – довжина хвилі, м.

$$\Lambda = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} Z. \quad (6.3)$$

Довжина хвилі – це шлях, пройдений хвилею за час  $Z$  (період коливання), дорівнює відстані між двома сусідніми максимумами або мінімумами.

Для огороження, що складається з  $n$ -шарів, показник теплової інерції дорівнює

$$R_K = R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_n S_n. \quad (6.4)$$

З рівняння (6.2) випливає, що теплова інерція  $D$  – безрозмірна характеристика, пропорційна числу температурних хвиль  $\delta/\Lambda$ , що поширюються в товщі огорожуючої конструкції. Тому величину  $D$  іноді називають умовною товщиною шару. Якщо  $D = 8,9$ , то в огороженні укладається одна температурна хвиля, при  $D < 8,9$  – неповна хвиля, а при  $D > 8,9$  – більше однієї хвилі.

З того ж виразу (6.2) випливає, що показник теплової інерції  $D$  залежить від періоду коливань  $Z$ : зі зменшенням  $Z$  збільшується. Тобто в огороженні укладається більше число довжин хвиль, довжина температурної хвилі зменшується і температурні коливання в товщі огороження швидше загасають. При збільшенні періоду коливань  $Z$  відбувається зворотне явище.

На величину коефіцієнта теплотасвоєння поверхні огороження впливає товщина матеріалу не всього огороження, а тільки тієї його частини, що перебуває в шарі різких коливань. Вся інша частина огороження поза цим шаром на коливання температурної хвилі практично не впливає.

**Шар різких коливань** – шар, що знаходиться між поверхнею огороження і умовною площиною, в якій амплітуда коливань температури становить близько половини амплітуди коливання темпе-

ратури на поверхні огороження (рис. 6.1). Він може знаходитись як у внутрішній, так і в зовнішній поверхні огороження залежно від напрямку теплової хвилі. У шарі різких коливань відбувається значне погашення температурної хвилі, завдяки чому в сусідніх шарах огороження амплітуда коливання температури буде незначною і нею практично можна знехтувати.

Оскільки в шар різких коливань вміщується близько  $1/8$  довжини хвилі (тобто  $\delta/\lambda = 1/8$ ), з виразу (6.2) випливає, що показник його теплової інерції становить  $D = 1$ . Товщина шару різких коливань для однорідного огороження  $\delta_{III}$  визначається з рівняння

$$D = R \cdot S = \frac{\delta_{III}}{\lambda} S = 1, \quad (6.5)$$

$$\delta_{III} = \lambda / S.$$

Як і показник інерції  $D$ , товщина шару різких коливань  $\delta_{III}$  залежить від періоду коливань  $Z$ : зі збільшенням періоду коливань – зростає, зі зменшенням – зменшується.

## Методика розрахунку теплостійкості огорожуючих конструкцій

При проектуванні житлових будинків, лікарняних установ (лікарень, клінік, стаціонарів і госпіталів), диспансерів, амбулаторно-поліклінічних установ, пологових будинків, будинків дитини, домів-інтернатів для старих та інвалідів, загальноосвітніх дитячих шкіл, будинків дитячих садів, ясел, садів-ясел (комбінатів), дитячих будинків, а також виробничих приміщень, в яких необхідно витримувати оптимальні норми температури і відносної вологості повітря в робочій зоні приміщення або за умовами технологічного режиму, повинні підтримуватися постійними температура і відносна вологість повітря.

У районах із середньомісячною температурою липня  $21^{\circ}\text{C}$  необхідно, щоб амплітуда коливання температури внутрішньої поверхні огорожуючих конструкцій,  $A_{\tau BH}$  (зовнішніх стін з тепловою інерцією  $D > 4$  і покриттів  $D > 5$ ) була менше потрібної амплітуди  $A_{\tau BH}^{ПОТ}$ ,  $^{\circ}\text{C}$



$$A_{\tau BH} < A_{\tau BH}^{ПОТ},$$

$$A_{\tau BH}^{ПОТ} = 2,5 - 0,1 (t_{3ОВН} - 21), \quad (6.6)$$

де  $t_{3ОВН}$  – середньомісячна температура зовнішнього повітря за липень, °С.

Амплітуда коливання температури внутрішньої поверхні огорожуючих конструкцій  $A_{\tau BH} = \frac{A_{\tau 3ОВН}^{РОЗР}}{\nu}$ , °С визначається як

$$A_{\tau BH} = \frac{A_{t 3ОВН}^{РОЗР}}{\nu}, \quad (6.7)$$

де  $A_{t 3ОВН}^{РОЗР}$  – розрахункова амплітуда коливання температури зовнішнього повітря, °С;  $\nu$  – величина загасання розрахункової амплітуди коливання температури зовнішнього повітря  $A_{t 3ОВН}^{РОЗР}$  в огорожуючій конструкції.

Розрахункову амплітуду коливання температури зовнішнього повітря  $A_{t 3ОВН}^{РОЗР}$ , °С можна знайти за формулою

$$A_{t 3ОВН}^{РОЗР} = 0,5 \cdot A_{t 3ОВН} + \frac{\rho \cdot (I_{МАХ} - I_{СЕР})}{\alpha_{3ОВН}}, \quad (6.8)$$

де  $A_{t 3ОВН}$  – максимальна амплітуда добових коливань температури зовнішнього повітря в липні, °С;  $\rho$  – коефіцієнт поглинання сонячної радіації матеріалом зовнішньої поверхні конструкції, що обгороджує [1];  $I_{МАХ}$ ,  $I_{СЕР}$  – відповідно максимальне і середнє значення сумарної сонячної радіації (прямої і розсіяної), Вт/м<sup>2</sup>, прийняте для зовнішніх стін – як для вертикальних поверхонь західної орієнтації і для покриттів як для горизонтальних поверхонь;  $\alpha_{3ОВН}$  – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні огорожуючих конструкцій, за літніми умовами Вт/(м<sup>2</sup> °С), що визначається за [1].

Величину загасання розрахункової амплітуди коливання температури зовнішнього повітря  $\nu$  в огорожуючій конструкції, що складається з однорідних шарів, визначають у такий спосіб:

$$\nu = 0,9 \cdot e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{(S_1 + \alpha_{BH})(S_2 + Y_1) \dots (S_N + Y_{N-1})(\alpha_{3ОВН} + Y_N)}{(S_1 + Y_1)(S_2 + Y_2) \dots (S_N + Y_N)\alpha_{3ОВН}}, \quad (6.9)$$

де  $e = 2,718$  – основа натуральних логарифмів;  $D$  – теплова інерція огорожуючої конструкції;  $S_1, S_2, \dots, S_N$  – розрахункові коефіцієнти теплозасвоєння матеріалу окремих шарів огорожуючої конструкції,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ , прийняті за додатком В;  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N$  – коефіцієнти теплозасвоєння зовнішньої поверхні окремих шарів огорожуючої конструкції,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_{BH}, \alpha_{ZOBH}$  – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях огорожуючої конструкції.

Щоб визначити коефіцієнти теплозасвоєння зовнішньої поверхні окремих шарів огорожуючої конструкції, спочатку необхідно обчислити теплову інерцію кожного шару. Якщо для даного шару  $D \geq 1$  коефіцієнт теплозасвоєння зовнішньої поверхні шару  $Y$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  приймають рівним коефіцієнту теплозасвоєння  $S$  матеріалу цього шару. Якщо  $D < 1$ , коефіцієнт теплозасвоєння зовнішньої поверхні шару  $Y$  визначають розрахунком, починаючи з першого шару від внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції, для першого шару:

$$Y_1 = \frac{R_1 \cdot S_1^2 + \alpha_{BH}}{1 + R_1 \cdot \alpha_{BH}}, \quad (6.10)$$

для І-го шару за формулою

$$Y_I = \frac{R_I \cdot S_I^2 + Y_{I-1}}{1 + R_I \cdot Y_{I-1}}, \quad (6.11)$$

де  $R_1, R_I$  – термічний опір відповідно першого і І-го шарів огорожуючої конструкції;  $S_1, S_I$  – розрахункові коефіцієнти теплозасвоєння матеріалу відповідно першого і І-го шарів огорожуючої конструкції;  $Y_1, \dots, Y_I, \dots$  – коефіцієнти теплозасвоєння зовнішньої поверхні окремих шарів огорожуючої конструкції.

## **Контрольні запитання**

1. Що таке теплостійкість будівельних конструкцій?
2. Що називається тепловою інерцією огорожуючої конструкції?
3. Якими параметрами можна охарактеризувати температурну хвилю?
4. Що являє собою шар різких коливань?
5. Чому в приміщеннях з масивними конструкціями відбувається запізнення зміни температури внутрішнього повітря при зміні температури зовнішнього?
6. Наведіть математичний зв'язок між тепловою інерцією та здатністю огороження гасити температурні коливання.
7. Який період коливання температури приймають для розрахунку теплостійкості огорожуючих конструкцій?

## **Лекція 7**

# **ВОЛОГІСНИЙ РЕЖИМ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **Розрахунок на можливу конденсацію пари**

Вологий будівельний матеріал є сприятливим середовищем для розвитку в ньому грибків, цвілі та інших біологічних процесів.

З підвищенням вологості зростає теплопровідність будівельних матеріалів. При підвищеній вологості ймовірними є процеси періодичного заморожування і відтавання будівельного матеріалу. Це призводить до розшарування матеріалу конструкції, що не допустимо. Тому при проектуванні й будівництві необхідно вживати заходи для запобігання можливому зволоженню матеріалів огороджуючих конструкцій.

***Причини зволоження огороджень.*** Причинами появи вологи в огородженнях можуть бути:

1. Будівельна волога, що потрапила в огородження при виготовленні конструкцій і зведенні будинків.
2. Ґрунтова волога, що проникає в огородження внаслідок капілярного всмоктування.
3. Атмосферна волога, що надходить в огородження при змочуванні зовнішньої поверхні атмосферними опадами.
4. Експлуатаційна волога, що випадає при виробничому процесі.
5. Волога, що знаходиться в огородженні внаслідок його гігроскопічності.
6. Волога, що конденсується з повітря як на поверхні огородження, так і в його товщі.

Рядом заходів (удосконаленням технології виготовлення та монтажу, конструктивних рішень огороджень та ін.) можна зменшити кількість вологи, яка знаходиться в огороджуючих конструкціях. Найбільше впливають на вологісний режим огороджень процеси конденсації й гігроскопічного (сорбційного) зволоження.

7. Нагадаємо, що гігроскопічність – властивість матеріалу поглинати (сорбувати) вологу з повітря. Сорбція – процес поглинання вологи з навколишнього повітря матеріалом огородження. Процес, що протікає у зворотному напрямку, називається десорбцією.

## Паропроникність і пароемкість

У холодну пору року температура повітря всередині приміщень значно вище температури повітря зовні. При цьому в приміщенні за рахунок виділення вологи відносна вологість повітря становить 40 – 70%. Відносна вологість повітря зовнішнього середовища змінюється залежно від переміщення великих мас повітря, танення снігу, випадання опадів, зміни температури й коливається в межах від 60 – 100%. Оскільки повітрообмін у холодну пору року в приміщеннях штучно обмежується, можна вважати, що приміщення більш-менш ізольоване від зовнішнього середовища.

Якщо прийняти середню температуру повітря в приміщенні рівною +18 °С і відносну вологість 50%, то величина парціального тиску водяної пари в повітрі приміщення складе 825 Па. Припустимо, зовні приміщення спостерігається температура повітря -10 °С і відносна вологість 90%. Тоді парціальний тиск водяної пари складе 233 Па. Ці дані свідчать про те, що в холодну пору року огорожуючі конструкції опалювальних будинків розділяють два повітряні середовища з різними значеннями парціального тиску водяної пари, причому тиск водяної пари усередині приміщення в холодну пору року завжди вище парціального тиску зовні. Подібне явище викликає потік водяної пари від внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції до зовнішньої і називається дифузією водяної пари.

Кількість водяної пари  $I$ , мг, що дифундує через плоску стінку в стаціонарних умовах дифузії

$$I = F \cdot \tau \cdot \frac{\mu}{\delta} (e_{BH} - e_{ZOVH}), \quad (7.1)$$

де  $F$  – площа поверхні перпендикулярна до потоку проникаючої водяної пари, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – час, протягом якого відбувається процес паропроникнення, год;  $\mu$  – коефіцієнт паропроникнення матеріалу, мг/(м год Па);  $\delta$  – товщина плоскої стінки, м;  $e_{BH}$ ,  $e_{ZOVH}$  – парціальний тиск водяної пари у внутрішньому і зовнішньому повітрі, Па.

Коефіцієнт паропроникності, за аналогією з коефіцієнтом теплопровідності, можна визначити як кількість водяної пари, мг, що передається через шар матеріалу товщиною 1 м за 1 годину при різниці парціальних тисків на поверхнях шару в 1 Па.

Величини коефіцієнта паропроникності для різних будівельних матеріалів наведені в додатку В і знаходяться в діапазоні від

0,0013 мг/(м год Па) для руберойду до 0,56 мг/(м год Па) для мінераловатних плит. Опори паропроникненню листових матеріалів і тонких шарів пароізоляції наведені в табл. 7.1.

Коефіцієнт паропроникнення залежить від вологовмісту матеріалу. Однак задовільного виразу для розрахунку його величини не знайдено, тому в розрахунках  $\mu$  приймають величиною постійною.

При розрахунках вологісного режиму огорожуючої конструкції в умовах стаціонарної дифузії водяної пари розраховують величину потоку водяної пари через огородження, розподіл парціальних тисків водяної пари й межі зони можливої конденсації усередині конструкції. Даний розрахунок не враховує зміну вологісного стану огорожуючої конструкції в ході часу, а також вплив початкової вологості матеріалу на вологісний режим огородження.

**Таблиця 7.1 – Опір паропроникненню листових матеріалів і тонких шарів пароізоляції**

№ п/п	Матеріал	Товщина шару, мм	Опір паропроникненню, м · год · Па/мг
1	Картон звичайний	1,3	0,016
2	Листи азбестоцементні	6	0,3
3	Листи гіпсові обшивальні (суха штукатурка)	10	0,12
4	Листи дерево волокнисті тверді	10	0,11
5	Листи дерево волокнисті м'які	12,5	0,05
6	Фарбування гарячим бітумом за один раз	2	0,3
7	Фарбування гарячим бітумом за два рази	4	0,48
8	Фарбування масляне за два рази з попередньою шпаклівкою й ґрунтовкою	-	0,64
9	Фарбування емалевою фарбою	-	0,48
10	Покриття ізолюючою мастикою за один раз	2	0,6
11	Покриття бітумно-кукерсольною мастикою за один раз	1	0,64
12	Покриття бітумно-кукерсольною мастикою за два рази	2	1,1
13	Пергамін покрівельний	0,4	0,33
14	Поліетиленова плівка	0,16	7,3
15	Руберойд	1,5	1,1
16	Толь покрівельна	1,9	0,4
17	Фанера клеєна тришарова	3	0,15

Розрахунки вологісного стану огорожуючих конструкцій для об'єктів з вологим і мокрим режимом експлуатації, які перебувають у вологій кліматичній зоні, необхідно проводити за методикою розрахунку нестационарної дифузії водяної пари, що розглядається нижче.

Величину, що описує властивість матеріалу накопичувати водяні пари, називають пароемкістю і позначають  $\xi$ , г/(кг Па). Питома пароемкість матеріалу показує, яка кількість водяної пари необхідна для підвищення тиску водяної пари в 1 кг матеріалу на 1 Па. Величина  $\xi$  залежить від температури. Оскільки визначити масу водяної пари в 1 кг матеріалу складно, у практику розрахунків введено поняття «відносна пароемкість»  $\xi_{\text{ВІДН}}$ , г/кг %. Під  $\xi_{\text{ВІДН}}$  розуміють кількість води в грамах, необхідну для підвищення відносної вологості повітря в порах 1 кг матеріалу від 0 до 100 %.

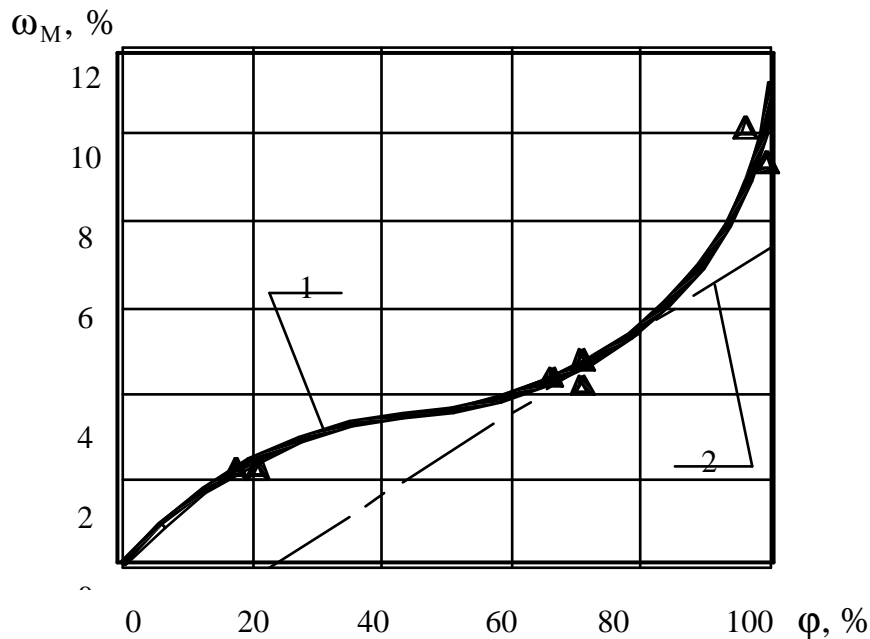


Рис. 7.2 – Зміна масової вологості пінобетону  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$  залежно від відносної вологості повітря (1 - ізотерма сорбції, 2 – дотична до ізотерми сорбції в точці з вологістю повітря 70%)

Величину питомої пароемкості визначають за ізотермою сорбції даного матеріалу. Ізотерма сорбції являє собою графік, що показує, як зміниться масова вологість за рахунок сорбції водяної пари матеріалом при зміні відносної вологості повітря на 1% (рис. 7.2).

Питома пароемкість визначається як диференціал масової вологості матеріалу за відносною вологістю повітря. Інакше кажучи, величина відносної пароемкості чисельно дорівнює тангенсу кута

між віссю абсцис і дотичною до ізотерми сорбції для певної відносної вологості повітря:

$$\xi_m = \frac{d\omega_M}{d\varphi} \cdot 1000, \quad (7.2)$$

або для малого відрізка ізотерми сорбції можна подати в кінцевих різницях:

$$\xi_M = \frac{\omega_{M2} - \omega_{M1}}{\varphi_2 - \varphi_1} \cdot 1000, \quad (7.3)$$

де –  $\omega_{M1}$ ,  $\omega_{M2}$  – найменша і найбільша масова вологість на даному відрізку ізотерми сорбції, %;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – відповідні їм відносні вологості повітря, %.

Між питомою пароемкістю  $\xi$  і відносною пароемкістю  $\xi_{ВІДН}$  існує наступний зв'язок:

$$\xi = \frac{\xi_{ВІДН}}{E}, \quad (7.4)$$

де  $E$  – максимальний тиск водяної пари при даній температурі, Па.

## Розрахунок на можливу конденсацію пари

У разі, коли проєктований об'єкт перебуває в сухій будівельно-кліматичній зоні та інтенсивність вологовиділень усередині об'єкта невелика, достатньо зробити розрахунок на можливу конденсацію водяної пари в товщі огороження за стаціонарними умовами паропроникнення.

Мета – визначити парціальний тиск водяної пари в товщі матеріалу огороження і наявність зони можливої конденсації в ній внаслідок паропроникнення.

Для виконання розрахунку необхідні такі вихідні дані: середньомісячні значення температури зовнішнього повітря й парціального тиску водяної пари в ньому  $e_{ЗОВН}$  за самий холодний місяць.

Розрахунок звичайно виконують графоаналітичним методом, розробленим О.Е. Власовим і К.Е. Фокіним. Метод полягає в тому, що на розрізі огороження будують лінії розподілу температур усередині конструкції, а також лінії дійсних і максимальних (насичуючих) парціальних тисків водяної пари. За взаємним розташуванням ліній парціальних тисків (дійсних і насичуючих) судять про можливу конденсацію водяної пари в масиві огороження.



Порядок розрахунку парціальних тисків наступний:

1. Визначення температури на межах шарів огороження:

$$t_X = t_{BH} - \frac{t_{BH} - t_{ЗОВН}}{R_O} (R_{BH} + \sum R_X), \quad (7.5)$$

де  $t_X$  – шукана температура в якому-небудь перерізі огороження, °С;  $t_{BH}$  – температура внутрішнього повітря приміщення, °С;  $t_{ЗОВН}$  – температура зовнішнього повітря, за яке приймають середню температуру найбільш холодного місяця року, бо процес паропроникнення протікає повільніше в порівнянні з теплопередачею, не встигаючи реагувати на короточасні зміни температури зовнішнього повітря;  $R_O$  – термічний опір огороження, (м<sup>2</sup>°С)/Вт;  $R_{BH}$  – термічний опір тепловіддачі внутрішньої поверхні огороження, (м<sup>2</sup>°С)/Вт;  $\sum R_X$  – сума термічних опорів шарів від внутрішньої поверхні конструкції до розглянутого перерізу.

Так, для огорожуючої конструкції, що складається з трьох шарів (рис. 7.3), обчислюють температури:

на внутрішній поверхні

$$\tau_{BH} = t_{BH} - \frac{t_{BH} - t_{ЗОВН}}{R_O} R_{BH}, \quad (7.6)$$

на межі першого й другого шарів

$$t_1 = t_{BH} - \frac{t_{BH} - t_{ЗОВН}}{R_O} (R_{BH} + R_1), \quad (7.7)$$

на границі другого й третього шарів

$$t_2 = t_{BH} - \frac{t_{BH} - t_{ЗОВН}}{R_O} (R_{BH} + R_1 + R_2), \quad (7.8)$$

на зовнішній поверхні огороження

$$\tau_{ЗОВН} = t_{BH} - \frac{t_{BH} - t_{ЗОВН}}{R_O} (R_{BH} + R_1 + R_2 + R_3), \quad (7.9)$$

де  $R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}$ ,  $R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}$ ,  $R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}$ .

2. Визначення максимально можливого тиску водяної пари при даній температурі  $E$  за отриманим значенням температур на межах шарів огороження за відповідними формулами або таблицями (додаток Ж). Так, для розглянутого випадку приймають:  $E_{BH}$  при температурі  $\tau_{BH}$ ;  $E_1$  при температурі  $t_1$ ;  $E_2$  при температурі  $t_2$ ;  $E_{ЗОВН.П}$  при температурі  $\tau_{Н}$ .

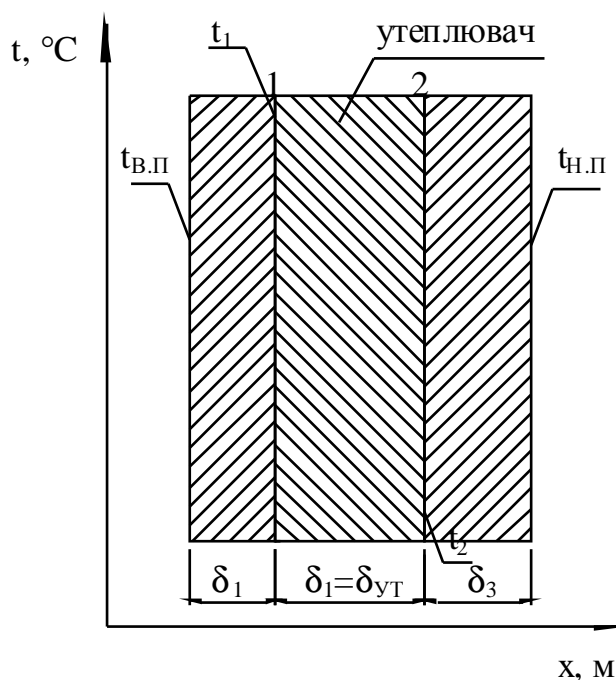


Рис. 7.3 – Конструкція, що складається з трьох шарів

дина;  $i$  – потік пари, віднесений до  $1 \text{ м}^2$  поверхні за 1 годину,  $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{ год})$

$$i = \frac{e_{BH} - e_X}{R_{П.ВП} + R_{П.Х}}, \quad (7.11)$$

де  $(e_{BH} - e)$  – різниця парціальних тисків водяної пари внутрішнього повітря приміщення і повітря в довільному перерізі X-X, Па;  $R_{П.Х}$  – опір паропроникненню від внутрішньої поверхні огороження до довільної площини в ньому X-X,  $(\text{м}^2 \text{ год Па})/\text{мг}$ ;  $R_{П.ВП}$  – опір процесу дифузії пари від внутрішнього повітря до внутрішньої поверхні огороження,  $(\text{м}^2 \text{ год Па})/\text{мг}$ .

Величина опору вологообміну пароподібної вологи на поверхні матеріалу істотно змінюється залежно від термодинамічних параметрів навколишнього середовища. Чим менше відносна вологість повітря, тим більше величина опору вологосприйняття, що зростає при гранично низькій відносній вологості до досить великої величини – енергії адсорбції мономолекулярного шару водяної пари:

$$R_{ПВП} = 133,3 \cdot \left( 1 - \frac{\varphi_B}{100} \right). \quad (7.12)$$

Рівняння балансу водяної пари відносно довільної площини X – X:

3. Розрахунок дійсних парціальних тисків водяної пари  $e$  на межах шарів огороження (за рівнянням балансу відносно розглянутого перерізу).

Загальна кількість водяної пари, що проникає (дифундує) при сталому потоці через огороження за час  $\tau$  годин:

$$I = i F \tau, \quad (7.10)$$

де  $F$  – площа поверхні, перпендикулярна до потоку проникаючої водяної пари,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – час, у ході якого відбувається процес паропроникнення, годин;

$$i_1 = i_2, \quad (7.13)$$

де  $i_1$  – потік пари, підведений до площини X-X від внутрішнього повітря приміщення;  $i_2$  – потік пари, що проходить через огороження від внутрішнього повітря приміщення до зовнішнього повітря. З рівнянь (7.11) і (7.13) випливає

$$\frac{e_{BH} - e_X}{R_{П.X}} = \frac{e_{BH} - e_{ЗОВН}}{R_{П}}, \quad (7.14)$$

звідки

$$e_X = e_{BH} - \frac{e_{BH} - e_{ЗОВН}}{R_{П}} R_{П.X}, \quad (7.14)$$

де  $e$  – парціальний тиск водяної пари в перерізі X – X, Па;  $e_{BH}$  – парціальний тиск водяної пари у внутрішньому повітрі приміщення, визначають за формулою

$$e_{BH} = \frac{\varphi \cdot E_{BH}}{100}, \quad (7.15)$$

де  $\varphi$  – відносна вологість внутрішнього повітря, прийнята відповідно до режиму експлуатації приміщення, %;  $E_{BH}$  – парціальний насичуючий тиск водяної пари при температурі повітря усередині приміщення  $t_B$ , Па;  $e_H$  – парціальний тиск (пружність водяної пари) у зовнішньому повітрі для розглянутого періоду, Па;  $R_{П}$  – загальний опір паропроникненню огороження, рівний сумі опорів біля внутрішньої  $R_{П.ВП}$  і зовнішньої  $R_{П.НП}$  поверхонь, а також

опорів усіх  $n$  шарів огороження  $\sum_{I=1}^N R_{ПI}$ .

Опір паропроникнення  $i$ -го шару  $R_{ПI}$  визначається як  $R_{ПI} = \frac{\delta_I}{\mu_I}$ , ( $\text{м}^2 \text{ год Па/мг}$ ), (тут  $N$  – число шарів у конструкції).

Наприклад, для тришарового огороження

$$\begin{aligned} R_{П} &= R_{ПВП} + R_{П1} + R_{П2} + R_{П3} + R_{ПНП} = \\ &= R_{ПВП} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + R_{ПНП}, \end{aligned}$$

де  $\delta_{1,2,3}$  – товщини шарів;  $\mu_{1,2,3}$  – коефіцієнт паропроникнення відповідних шарів конструкції, ( $\text{мг/м год Па}$ ), характеризує кількість пари в міліграмах, що проникає через  $1 \text{ м}^2$  поверхні огороження за 1 годину при градієнті парціальних тисків водяної пари на поверхнях, рівному  $1 \text{ Па/м}$ .

Для багат шарової конструкції  $R_{\Pi, X}$  розраховується як сума опорів паропроникненню окремих шарів  $R_{\Pi I} = \frac{\delta_I}{\mu_I}$ , починаючи від внутрішньої поверхні огорожуючої конструкції до площини можливої конденсації X – X.

Для тришарової огорожуючої конструкції (рис. 7.3) величини парціального тиску в перерізах конструкції:

на внутрішній поверхні

$$e_{B\Pi} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\Pi}} R_{\Pi B\Pi}, \quad (7.16)$$

на межі першого й другого шарів

$$e_1 = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\Pi}} (R_{\Pi B\Pi} + R_{\Pi 1}), \quad (7.17)$$

на межі другого й третього шарів

$$e_2 = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\Pi}} (R_{\Pi B\Pi} + R_{\Pi 1} + R_{\Pi 2}), \quad (7.18)$$

на зовнішній поверхні огородження

$$e_{H\Pi} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\Pi}} (R_{\Pi B\Pi} + R_{\Pi 1} + R_{\Pi 2} + R_{\Pi 3}). \quad (7.19)$$

За значеннями температури  $t$ , встановленими за (7.6) - (7.9); насичуючих  $E$  і дійсних  $e$  парціальних тисків, розрахованих за виразами (7.16) – (7.19), будують лінії зміни розподілу цих величин за товщиною огородження. По осі абсцис відкладають величини опору паропроникнення шарів, а по осі ординат – значення парціальних тисків і температури (рис. 7.4).

Якщо лінія  $e$  лежить нижче лінії насичуючих парціальних тисків  $E$ , то водяна пара, яка дифундує, не буде конденсуватися в товщині огородження. Перетин цих ліній вказує на можливість конденсації. Перерізи, в яких значення  $e > E$ , є зоною можливої конденсації.

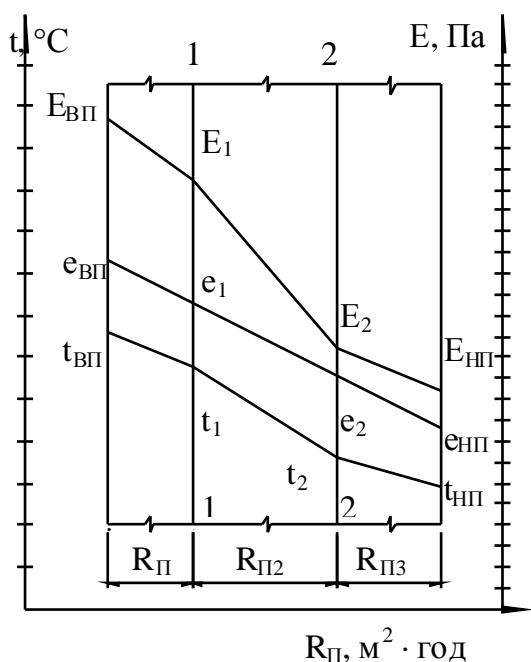


Рис. 7.4 – Розподіл насичуючої температури  $t$ ,  $E$  і  $e$  парціальних тисків в огороджуючій конструкції

Цей метод розрахунку дозволяє визначити тільки кінцеві термодинамічні можливі стани, характерні для завершальних стадій процесу, не розглядаючи хід цього процесу в часі. Нагромадження вологи може й не наступити, бо для стабілізації процесу зволоження тривалість холодного періоду може виявитися недостатньою.

## Лекція 8

# ВОЛОГІСНИЙ РЕЖИМ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

### Розрахунок опору паропроникнення за умови недопущеності нагромадження вологи

Для споруд з вологим і мокрим режимом експлуатації рекомендується проводити розрахунок опору паропроникнення огороджуючої конструкції, виходячи з умови неприпустимості нагромадження вологи в огороженні за річний період, і розрахунок опору паропроникнення огороджуючої конструкції з умови обмеження нагромадження вологи за період з від'ємними середньомісячними температурами.

Мета розрахунку опору паропроникненню огороджуючої конструкції з умови недопустимості нагромадження вологи в огороженні за річний період – визначити опір паропроникненню огороження  $R_{ПХ}$  від внутрішньої поверхні конструкції до площини можливої конденсації; порівняти отриману величину  $R_{ПХ}$  з потрібним опором  $R_{ПІ}^{ПОТР}$ , знайденим з умови недопустимості нагромадження вологи в огороджуючій конструкції за річний період експлуатації.

Площина можливої конденсації в одношаровій однорідній огороджуючій конструкції приймається на відстані  $X$ , рівній  $2/3$  товщини конструкції від її внутрішньої поверхні (рис. 8.1,а); у багатошаровій конструкції ця площина збігається із зовнішньою поверхнею утеплювача (рис. 8.1,б). Визначивши площину можливої конденсації в огороженні, обчислюють величину опору паропроникненню  $R_{ПХ}$  від внутрішньої поверхні до цієї площини.

Потрібний опір паропроникненню  $R_{ПІ}^{ПОТР}$  визначають з умови балансу середньої за рік кількості водяної пари відносно площини можливої конденсації (рис. 8.1):

$$i = i_l, \quad (8.1)$$

де  $i$  й  $i_l$  - кількість пари відповідно, що надходить з дифузії до  $1 \text{ м}^2$  площини можливої конденсації і відводиться від неї за

1 годину ( $\text{мг/м}^2 \text{ год}$ ); значення  $i$  встановлюють як середньорічні.

Відповідно до рівняння (7.13) кількість вологи, що конденсується в холодну пору року, буде віддалятися від огороження в теплу пору року й в огороженні за рік не буде накопичуватися волога.

Розглядаючи спільно рівняння (7.11) і (7.13), отримаємо

$$\frac{e_B - E}{R_{П.X}} = \frac{E - e_H}{R_{П.H}}, \quad (8.2)$$

де  $E$  – середнє за рік значення парціального насичуючого тиску водяної пари в площині можливої конденсації (переріз X-X);  $e_B$  – парціальний тиск водяної пари у внутрішньому повітрі приміщення, визначений за формулою (7.15);  $R_{П.H}$  – опір паропроникненню шарів огороження, що містяться між площиною можливої конденсації й зовнішньою поверхнею огороження (рис. 8.1),  $e_H$  – парціальний тиск водяної пари зовнішнього повітря, що визначається як

$$e_{ЗОВН} = \frac{1}{12} \sum_{I=1}^{12} e_{ЗОВН I}.$$

Позначивши  $R_{П.X} = R_{П I}^{ПОТР}$ , одержимо

$$R_{П I}^{ПОТР} = \frac{e_{ВН} - E}{E - e_{ЗОВН}} R_{П.H}. \quad (8.3)$$

Величина середнього за рік насичуючого тиску водяної пари в площині можливої конденсації визначається як

$$E = \frac{1}{12} (E_1 \cdot z_1 + E_2 \cdot z_2 + \dots + E_3 \cdot z_3) \quad (8.4)$$

де  $E_1, E_2, E_3$  – максимальні насичуючі тиски водяної пари, Па, прийняті за температурою в площині можливої конденсації, що визначається за (8.1) при середній температурі зовнішнього повітря  $t_H$  відповідно зимового, весняно-осіннього й літнього періодів;  $z_1, z_2, z_3$  – тривалість останніх, міс.

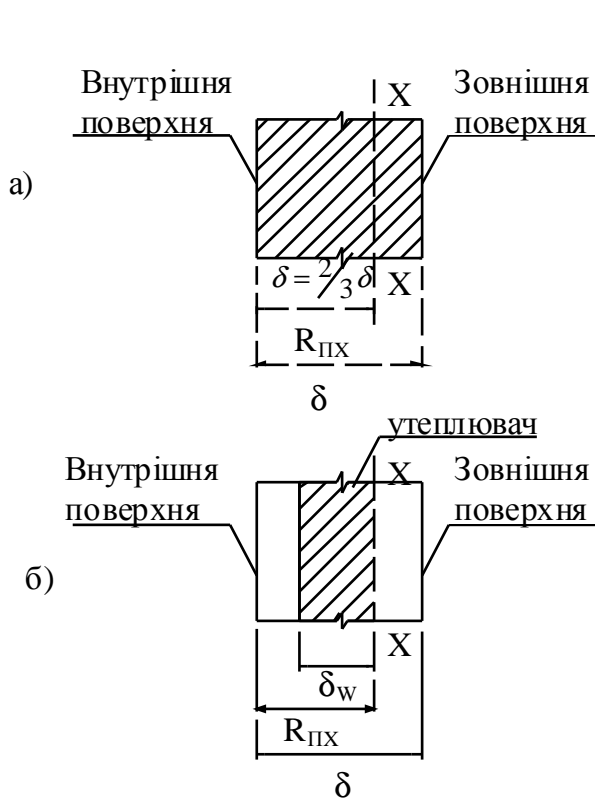


Рис. 8.1 – Площина можливої конденсації в:  
а – одношаровій, б – багатошаровій конструкції

До зимовому періоду відносяться місяці із середньомісячними температурами повітря нижче мінус 5 °С, до весняно-осіннього періоду – місяці із середньомісячними температурами повітря, що лежать в діапазоні від мінус 5 °С до плюс 5 °С, до літнього періоду відносяться місяці із середньомісячними температурами повітря вище плюс 5 °С.

Опір паропроникненню шарів огороження, що містяться між площиною можливої конденсації й зовнішньою поверхнею огорожуючої конструкції, визначається, як сума опорів паропроникненню цих шарів.

## Розрахунок опору паропроникненню з умови обмеження нагромадження вологи

Мета розрахунку опору паропроникненню огорожуючої конструкції з умови обмеження нагромадження вологи за період з негативними середньомісячними температурами – визначити опір паропроникненню від внутрішньої поверхні конструкції до площини можливої конденсації; зрівняти отриману величину  $R_{пх}$  з потрібним  $R_{пх}^{ПОТР}$ , знайденим за умови обмеження нагромадження вологи в огорожуючій конструкції за період з негативними середньомісячними температурами зовнішнього повітря.

Рівняння балансу водяної пари відносно площини можливої конденсації в цьому випадку має вигляд

$$I = I_1 + I_2, \quad (8.5)$$



де  $I$  – кількість водяної пари, мг, що підводиться до  $1 \text{ м}^2$  площини можливої конденсації за весь період вологонакопичення (за всю кількість днів в році з від'ємними температурами зовнішнього повітря),  $\text{мг/м}^2$ ;  $I_1$  – кількість водяної пари, що відводиться за той же період,  $\text{мг/м}^2$ ;  $I_2$  – кількість водяної пари, що конденсується в матеріалі шару огороження, який зволожується,  $\text{мг/м}^2$ .

Всі значення  $I$  віднесені до  $1 \text{ м}^2$  площині можливої конденсації, перпендикулярної до проникаючого (який дифундує) потоку водяної пари:

$$I = 24 \cdot Z_O \cdot i = \frac{24 \cdot Z_O \cdot (e_{BH} - E_{X.O})}{R_{П.X}}, \quad (8.6)$$

де  $Z_O$  – число доби всього періоду вологонакопичення;  $24$  – число годин в одній добі;  $i$  – потік пари,  $\text{мг/м}^2 \cdot \text{год}$ , що визначається за формулою

$$i = \frac{e_{BH} - E_{X.O}}{R_{П.X}}. \quad (8.7)$$

Тут  $e_{BH}$  – парціальний тиск водяної пари в повітрі приміщення, Па;  $E_{XO}$  – середнє значення насичуючого тиску водяної пари, Па, за період з від'ємними середньомісячними температурами зовнішнього повітря у площині можливої конденсації;  $R_{ПХ}$  – опір паропроникненню всіх шарів огорожуючої конструкції, що містяться між внутрішньою поверхнею огороження і площиною можливої конденсації.

$$I_1 = 24 \cdot Z_O \cdot i_1 = \frac{24 \cdot Z_O \cdot (E_{XO} - e_{ЗОВН})}{R_{ПН}}, \quad (8.8)$$

де  $e_{ЗОВН}$  – середній парціальний тиск водяної пари в зовнішньому повітрі за період із середньомісячними негативними температурами, Па;  $i_1$  – потік пари,  $\text{мг/(м}^2 \cdot \text{год)}$ , яка відводиться від  $1 \text{ м}^2$  поверхні за 1 годину і визначається за формулою

$$i_1 = \frac{E_{XO} - e_{ЗОВН}}{R_{ПН}}, \quad (8.9)$$

де  $e_{ЗОВН}$  – те ж, що й у виразі (8.8);  $R_{ПН}$  – те ж, що й у формулі (8.2).

Потік пари, що йде на зволоження матеріалу конструкції за період із середньомісячними негативними температурами, дорівнює

$$I_2 = m_W \cdot \Delta w_{CP} = \rho_W \cdot \delta_W \cdot \Delta w_{CP} \cdot 10^4, \quad (8.10)$$

де  $m_W$  – маса шару матеріалу, що зволожується, кг;  
 $m_W = \rho_W \cdot V_W = \rho_W \cdot \delta_W$ ,  $\rho_W$  – густина матеріалу, що зволожується, кг/м<sup>3</sup>;  $V_W$  – об'єм шару матеріалу, що зволожується, м<sup>3</sup>;

$$V_W = \delta_W \cdot F,$$

де  $\delta_W$  – товщина шару огорожуючої конструкції, що зволожуються;  $F = 1$  м<sup>2</sup>, оскільки розрахунок виконується відносно одиниці площі площини можливої конденсації;  $\Delta w_{CP}$  – гранично допустиме збільшення розрахункового масового відношення вологи у матеріалі, що зволожується, %, за період вологонакопичення  $Z_O$ , діб і наведено у [1], [5 розділ 8.5].

Слід мати на увазі, що 1 % вагової вологості матеріалу відповідає 10 м вологи на 1 кг матеріалу (або 10<sup>4</sup> мг на 1 кг матеріалу).

Рівняння (8.5) з урахуванням виразів (8.6), (8.7), (8.10) матиме вигляд

$$\frac{24 \cdot Z_O \cdot (e_B - E_{XO})}{R_{ПХ}} = \frac{24 \cdot Z_O \cdot (E_{XO} - e_H)}{R_{ПН}} + \rho_W \cdot \delta_W \cdot \Delta w_{CP} \cdot 10^4, (8.11)$$

Позначивши  $R_{ПХ} = R_{П2}^{TP}$ , отримаємо

$$\begin{aligned} R_{П2}^{TP} &= \frac{0,0024 \cdot Z_O \cdot (e_B - E_{X.O})}{\frac{0,0024 \cdot Z_O \cdot (E_{X.O} - e_H)}{R_{П.Н}} + \rho_W \cdot \delta_W \cdot \Delta w_{CP}} = \\ &= \frac{0,0024 \cdot Z_O \cdot (e_B - E_{X.O})}{\eta + \rho_W \cdot \delta_W \cdot \Delta w_{CP}} \end{aligned} \quad (8.12)$$

Тут прийняте позначення  $\eta = \frac{0,0024 \cdot Z_O \cdot (E_{X.O} - e_H)}{R_{П.Н}}$ .

Результати розрахунків за методиками, наведеними вище, оцінюють, виходячи з умови, що опір паропроникненню огороження  $R_{ПХ}$  (опір паропроникненню шарів від внутрішньої поверхні конструкції до площини можливої конденсації) повинен бути не менше найбільшого з необхідних опорів паропроникненню  $R_{П1}^{TP}$  або  $R_{П2}^{TP}$ . Якщо ця умова не дотримується, то для запобігання небажаних конденсації в масиві огороження треба передбачити додатковий шар пароволяції. Товщину цього шару визначають з умови, що  $R_{ПХ} \leq R_{П}^{TP}$ , де  $R_{П}^{TP}$  дорівнює більшому значенню необхідного опору паропроникненню  $R_{П1}^{TP}$  або  $R_{П2}^{TP}$ . Нарешті, опір паропроникнен-

ню додаткового пароізоляційного шару огороження визначається як

$$R_{\text{ПД}} = R_{\text{П}}^{\text{ТР}} - R_{\text{ПХ}}. \quad (8.13)$$

За отриманим значенням  $R_{\text{ПД}}$  підбирають додатковий пароізоляційний шар за табл. 8.1, де наведені характеристики листових матеріалів і тонких шарів пароізоляції.

## **Розрахунок вологісного режиму за нестационарними умовами дифузії водяної пари**

Наведені вище розрахунки вологісного режиму огорожуючих конструкцій будинків у стаціонарних умовах дифузії водяної пари не враховують зміни вологовмісту та вологісних характеристик матеріалу огороження з часом. Практика експлуатації огорожуючих конструкцій показує, що дійсні умови дифузії водяної пари відрізняються від стаціонарних через інерційність даних процесів. Тому при розрахунках будинків з вологим і мокрим режимом експлуатації, а також зовнішніми й внутрішніми параметрами повітряного середовища, що змінюються в часі, розрахунок вологісного режиму огорожуючої конструкцій необхідно проводити для нестационарних умов дифузії водяної пари.

Диференціальне рівняння дифузії водяної пари через плоску стінку можна одержати аналогічно диференціальному рівнянню теплопровідності:

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\xi \rho} \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \quad (8.14)$$

де  $e$  – парціальний тиск водяної пари,  $\tau$  - час, інші характеристики були розглянуті вище.

Як вже було показано, питомою пароемкістю  $\xi$ , г/(кг Па) користуватися незручно. Значно зручніше брати  $\xi_0$  - відносну пароемкість, г/кг %.

При цьому диференціальне рівняння дифузії водяної пари набере вигляд

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu \cdot E_s}{\xi_0 \rho} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \quad (8.15)$$

де  $E_s$  – максимальний тиск водяної пари при даній температурі.

Для вирішення рівняння (8.15) необхідно знати розподіл температур в огорожуючій конструкції. Вводиться допущення, що поле температур постійне в часі, тому що процес дифузії водяної пари набагато інерційніший, ніж процес теплопровідності. Виходячи з вищесказаного, зміна температури в огороженні, для якого звичайно потрібно 2, 3 дні, можна замінити моментальним переходом від одного температурного режиму до іншого.

При дуже великих кількостях вологи, що конденсується, або при експлуатації вологих і мокрих огорожуючих конструкціях крім зміни вологісного стану матеріалу за рахунок паропроникнення треба враховувати також зміну вологісного стану матеріалу за рахунок вологопровідності.

## Вологопровідність

Переміщення рідини по капілярах матеріалу відбувається тільки тоді, коли в матеріалі з'являється незв'язана волога, тобто при досить значному зволоженні матеріалу. Способи появи вологи в матеріалі досить різні й були розглянуті раніше. Найбільш часто зустрічаються процеси зволоження матеріалу за рахунок сорбції водяних парів з атмосферного повітря й процеси термічної конденсації водяних парів. У результаті цих процесів у порах матеріалу накопичується волога. На початковій стадії зволоження волога зосереджується в найбільш дрібних капілярах і місцях стику окремих часток. Оскільки окремі крапельки між собою не зв'язані, то переміщуватися вони не можуть. Переміщення вологи починається тоді, коли волога, зосереджена в окремих капілярах, починає зливатися воедино. Ця стадія переміщення вологи називається капілярною дифузією. Через те, що волога заповнює собою не весь об'єм капіляра, то в ньому також може переміщуватися вологе повітря й дифундувати водяні пари.

При подальшому зволоженні матеріалу капіляри продовжують заповнюватися, і вологе повітря може бути затиснуте в порожнинах між вологою й кістком матеріалу. Такий вологісний стан матеріа-

лу огорожуючої конструкції в будівництві недопустимий і тому тут не розглядається.

Для переміщення вологи в матеріалі в рідкій фазі необхідний градієнт вологості. При розрахунках вологісного режиму за стаціонарними умовами припускають, що кількість переміщуваної вологи  $P$ , гр. прямо пропорційна градієнту вологості:

$$P = F \cdot \tau \cdot \beta \cdot (\omega_{M2} - \omega_{M1}), \quad (8.16)$$

де  $F$  – площа поверхні, перпендикулярна до потоку вологи,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – час, за який відбувається процес вологопровідності, год;  $\beta$  – коефіцієнт вологопровідності матеріалу,  $\text{г/м} \cdot \%$ .

Коефіцієнт вологопровідності, за аналогією з коефіцієнтом теплопровідності, можна визначити як кількість вологи, г, що передається через шар матеріалу в 1 м за 1 годину при різниці масової вологості матеріалу в 1%.

Коефіцієнт вологопровідності - величина не постійна і є функцією структури матеріалу, градієнта вологості, характеру зв'язку вологи з матеріалом, а також температури матеріалу. При зміні температури змінюються поверхневий натяг і динамічна в'язкість води. Вплив температури на величину коефіцієнта вологопровідності за рахунок зміни в'язкості й поверхневого натягу рідини в порах матеріалу враховується співвідношенням

$$\beta_T = \beta_O \frac{\mu_O \cdot \sigma_T}{\mu_T \cdot \sigma_O}, \quad (8.17)$$

Індекси  $O$  і  $T$  ставлять до відповідних температур.

Величина коефіцієнта динамічної в'язкості для води

$$\mu_T = e^{\left( \frac{479}{t+118,5} + 0,0002 \cdot t \cdot \sin(\pi i^2 \cdot t) \right)}. \quad (8.18)$$

Величина коефіцієнта поверхневого натягу

$$\sigma_t = 3,114 \cdot \left( \frac{374 - t}{647,15} \right)^{1,246} \cdot (1 - 0,625 \cdot (374 - t)). \quad (8.19)$$

Беручи до уваги (8.18) і (8.19) по (8.17), визначають величину коефіцієнта вологопровідності  $\beta_T$ .

При охолодженні матеріалу нижче температури замерзання рідини в порах матеріалу частина рідини перетворюється в кріюфазу, а зміна градієнта вологості приводить до зміни коефіцієнта во-

логопровідності. Все це треба враховувати при проведенні розрахунків.

## Розрахунок спільного переміщення вологи

Цей розрахунок виконують, якщо треба знати динаміку зміни вологісного стану огорожуючої конструкції. При його проведенні досить ефективним є кінцево-різницевий метод. На досліджувану конструкцію наноситься просторова сітка (для одномірного випадку з кроком  $\Delta x$ ) з  $n$ -м числом вузлів, у кожному з яких перебуває наближене вирішення диференціального рівняння паропроникнення і вологопровідності для відповідних моментів часу з тимчасовим кроком  $\Delta \tau$ .

При оцінці вологісного стану найбільш загальною є ситуація,

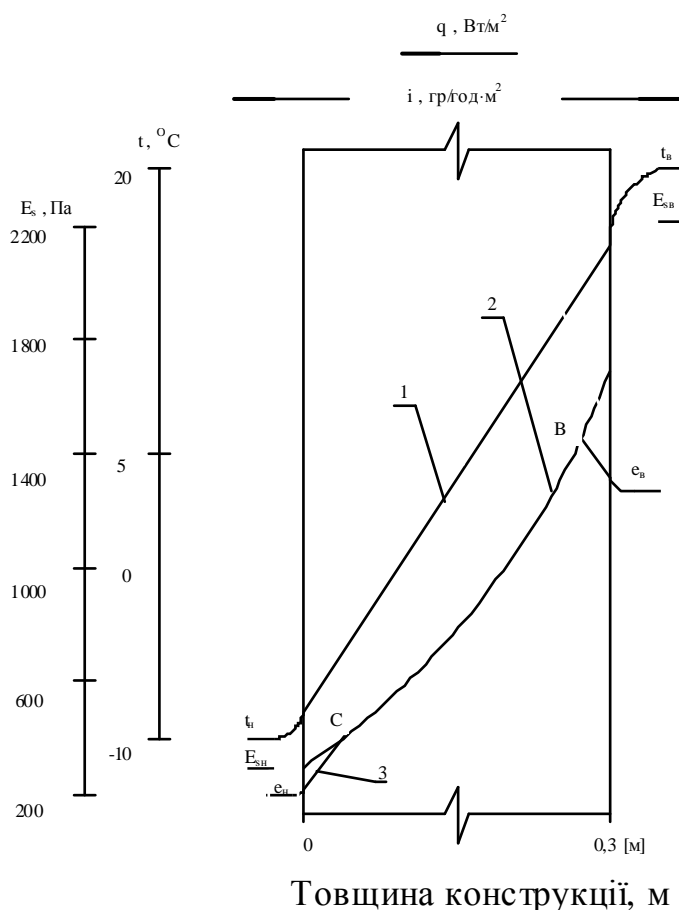


Рис. 8.2 – Дифузія водяної пари в конструкції при наявності градієнта температури;  
1 – розподіл температури; 2 – тиск насичення;  
3 – парціальний тиск водяної пари

коли в конструкції є ділянки з вологістю як більшою, так і меншою, ніж максимальна сорбційна. При цьому можуть спостерігатися наступні два випадки. Перший, якщо величина парціального тиску водяної пари в перерізах конструкції  $e = \varphi_I \cdot E_{s,I}(t_I)$  рівна тиску насичення водяної пари при даній температурі, тобто  $\varphi_n = 100\%$ , і більше величини парціального тиску водяної пари всередині  $e_B = \varphi_B \cdot E_s(t_B)$  і зовні приміщення  $e_H = \varphi_H \cdot E_s(t_H)$ . При цьому  $\text{grad } t \neq 0$ : відбувається осушення конструкції при наявності градієнта температури.

У цьому разі в конструкції є зона, в якій водяні пари перебувають у насиченому стані  $\varphi = 100\%$  (зона *BP*). До поверхонь водяні пари дифундують у ненасиченому стані (зона *AB* і *CD*) (рис. 8.2). Для зони *BP*, в якій протікає дифузія водяної пари під дією градієнта тиску насичення і капілярного переміщення вологи, рівняння балансу водяної пари виглядає в такий спосіб:

$$L_k = \mu \cdot \Delta \tau \cdot \left( \frac{E_{S_{i-1}}}{\Delta x} + \frac{E_{S_{i+1}}}{\Delta x} - 2 \cdot \frac{E_{S_i}}{\Delta x} \right), \quad (8.20)$$

де  $L_k$  – кількість водяної пари, що проходить через фазові зміни в зоні *BP*.

Зміна вологості шару  $\Delta \omega$ , %, за інтервал часу  $\Delta \tau$ :

$$\Delta \omega_M = \frac{L_K \cdot \Delta \tau}{10 \cdot \Delta x_i \cdot \Delta \rho_i}. \quad (8.21)$$

Зміну вологості матеріалу за рахунок градієнта вологості визначають за рівнянням

$$\Delta \omega = \frac{\beta \cdot \Delta \tau}{10 \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\omega_{M_{i-1}} + \omega_{M_{i+1}} - 2 \cdot \omega_{M_i}}{\Delta x^2} \right). \quad (8.22)$$

Оскільки величина коефіцієнта вологопровідності  $\beta$  залежить від зміни вологості матеріалу, його необхідно перераховувати на кожному кроці за часом і координатою. Думаючи, що значення коефіцієнта вологопровідності мало змінюється в проміжках між вузловими точками й монотонно залежить від вологості матеріалу  $\omega_M$  і його температури, середні величини коефіцієнтів вологопровідності на ділянках обчислюють за формулою

$$\beta_{n \pm 1} = \frac{\beta(\omega_{m_{i+1}}, t_{i+1}) + \beta(\omega_{m_i}, t_i)}{2}. \quad (8.23)$$

При відсутності градієнта температури в зоні *BP* дифузія водяної пари відсутня, бо немає градієнта тиску насичення (рис. 8.3). Тому переміщення вологи в зоні *BP* відбувається тільки під впливом градієнта вологості.

Точки *B* і *C* – граничні точки зони капілярного переміщення вологи. Поза зоною *BP* конструкція перебуває на сорбційній стадії зволоження, в якій переміщення рідкої вологи незначне, бо градієнт вологості малий.

Для точок *У* і *С* рівняння балансів водяної пари має вигляд

$$L_k = \mu \cdot \frac{E_{S_{i-1}}}{\Delta x} + \mu \cdot \frac{e_{i+1}}{\Delta x} - 2 \cdot \mu \cdot \frac{E_{S_i}}{\Delta x}; \quad (8.24)$$

$$L_k = 2 \cdot \mu \cdot \frac{E_{S_i}}{\Delta x} - \mu \cdot \frac{e_{S_{i-1}}}{\Delta x} - \mu \cdot \frac{E_{S_{i+1}}}{\Delta x}, \quad (8.25)$$

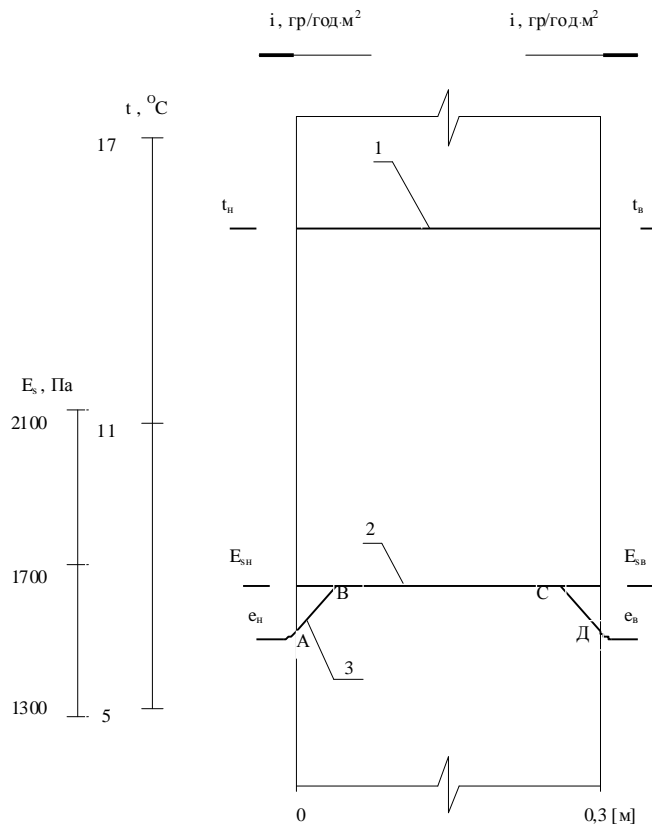
а зміна вологості матеріалу в цих точках, %

$$\Delta \omega_M = \frac{L_K \cdot \Delta \tau}{10 \cdot \Delta x_i \rho_i}. \quad (8.26)$$

Якщо точка конденсації або випаровування лежить на поверхні конструкції, кількість води, що проходить через фазові зміни, %, дорівнює

$$\Delta \omega_m = \frac{L_K \cdot \Delta \tau}{5 \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i}. \quad (8.27)$$

Якщо рідина проходить фазовий перехід у точці, що лежить на грані зіткнення двох матеріалів, виникає питання про пропорції розподілу води між матеріалами, яке слід визначати залежно від величини відносного потенціалу вологості. Таким чином, кількість води, що пройшла фазові зміни, %, у площині зіткнення двох матеріалів для  $i$ -го та



Товщина конструкції [м]

Рис. 8.3 – Дифузія водяної пари в конструкції при відсутності градієнта температури; 1 - розподіл температури, 2 – тиск насичення; 3 - парціального тиску водяної пари

( $i+1$ )-го шару матеріалу буде рівною

$$\Delta \omega_{MI} = \frac{L_K \cdot \Delta \tau}{5 \cdot (\Delta x_i \cdot \rho_i + \Delta x_{i+1} \cdot \rho_{i+1})} \cdot \frac{P_{o_i}}{P_{o_i} + P_{o_{i+1}}}, \quad (8.28)$$

$$\Delta \omega_{MI+1} = \frac{L_K \cdot \Delta \tau}{5 \cdot (\Delta x_i \cdot \rho_i + \Delta x_{i+1} \cdot \rho_{i+1})} \cdot \frac{P_{o_{i+1}}}{P_{o_i} + P_{o_{i+1}}}. \quad (8.29)$$

Послідовно визначаючи зміну вологості будівельного матеріалу, можна встановити тенденцію зміни величини коефіцієнта теп-



лопроводності, а також урахувати вплив інтенсивності джерел істоків теплоти на температурне поле. Це дозволить, у свою чергу, більш точно оцінити зміну вологісного стану огорожуючої конструкції у часі.

## **Контрольні запитання**

1. Розкажіть про фізичний зміст коефіцієнта проникнення водяної пари.
2. Наведіть визначення опору проникнення водяної пари для багатошарової огорожуючої конструкції.
3. Розкажіть про фізичний зміст пароемкості матеріалу.
4. Розкрийте поняття площини можливої конденсації.
5. Наведіть графічну схему одномірного поля парціальних тисків водяної пари для багатошарової огорожуючої конструкції.
6. Коли в огорожуючих конструкціях настає термічна конденсація водяної пари?
7. Як залежить зміна парціального тиску водяної пари в шарі матеріалу від його коефіцієнта паропроникання?
8. Розкажіть про фізичний зміст коефіцієнта вологопровідності будівельного матеріалу.
9. Від яких факторів залежить величина коефіцієнта вологопровідності?

## Лекція 9

# ПОВІТРОПРОНИКНІСТЬ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

### Опір повітропроникненню зовнішніх огорожень

**Повітропроникнення** (фільтрація) – це процес проникнення повітря через матеріал або конструкцію під дією різниці тисків повітря на межах огороження. Якщо при фільтрації відбувається надходження зовнішнього повітря у приміщення, то цей процес називається **інфільтрацією**, якщо з приміщення назовні – **ексфільтрацією**. Інфільтрація збільшує витрату теплоти на нагрівання повітря, що надходить у приміщення, а ексфільтрація сприяє конденсації вологи в зовнішніх огороженнях, оскільки внутрішнє повітря звичайно містить більше водяної пари, ніж зовнішнє.

Фільтрацію треба відрізнити від явища **дифузії**, що являє собою молекулярний процес, який відбувається по обидві сторони огороження при різних величинах парціального тиску окремих газів у складі повітря. При цьому повний тиск повітря по обидві сторони огороження може бути однаковий. При фільтрації відбувається рух порівняно великих мас повітря разом з парами, що входять до них.

Властивості матеріалу або огорожуючої конструкції пропускати повітря **називають** повітропроникністю.

Повітропроникнення значно впливає на тепловий режим приміщення. Заповнення світлових прорізів (вікна, балконні двері та ліхтарі), як правило, мають найменший опір повітропроникненню в порівнянні з масивними огорожуючими конструкціями, що приводить до збільшення тепловтрат. Додаткові тепловтрати на нагрівання повітря, що надходить у приміщення при інфільтрації, повинні враховуватися в тепловому балансі приміщення.

Повітропроникнення будівельних матеріалів в основному залежить від структури матеріалу, його пористості, вологості й оцінюється коефіцієнтом опору повітропроникненню  $R_L$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}$ )/кг. Розрахунок огорожень на опір повітропроникнен-

ню виконують, відповідно до вимог [1], так, щоб опір повітропроникненню розглянутої конструкції був не менше потрібної величини  $R_I^{ПОТР}$ .

Різниця тисків, що викликають рух повітря через огорожуючу конструкцію, рівна сумі гравітаційного  $P_t$  і вітрового  $P_W$  тиску

$$\Delta P = \Delta P_t + \Delta P_W.$$

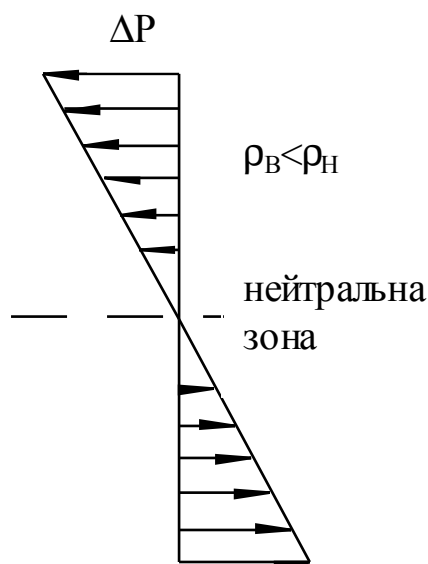


Рис. 9.1 – Положення нейтральної зони

Надлишковий гравітаційний тиск виникає внаслідок різниці густини повітря з різною температурою зовні й усередині будинку. Якщо температура повітря усередині приміщення вище температури зовнішнього повітря, то густина зовнішнього повітря  $\rho_{ЗОВН}$  більше густини внутрішнього повітря  $\rho_{ВН}$ , і холодне повітря входить у нижню частину огороження. У приміщенні повітря нагрівається, піднімається під покриття приміщення і виходить у верхній частині приміщення через матеріал огороження та нещільності в ньому. Внизу створюється розрідження

і внаслідок цього спостерігається інфільтрація, вгорі приміщення - ексфільтрація в результаті дії надлишкового тиску. Між ділянками інфільтрації та ексфільтрації знаходиться нейтральна зона, різниця тисків повітря в якій дорівнює нулю (рис. 9.1).

Якщо притік рівний витяжці, нейтральна зона знаходиться посередині висоти будинку ( $h = 0,5 H$ ). У холодний період року надходження приточного повітря обмежується й положення нейтральної зони зміщується у верхню частину будинку ( $h = 0,55 H$ ). Максимальний гравітаційний тиск

$$\Delta P_t = 0,55 \cdot H \cdot (\gamma_{ЗОВН} - \gamma_{ВН}), \quad (9.1)$$

де  $H$  – висота будинку від поверхні землі до верху карниза;  $\gamma_{ЗОВН}$ ,  $\gamma_{ВН}$  – питома вага зовнішнього й внутрішнього повітря.

Питому вагу повітря  $\gamma$  (Н/м<sup>3</sup>) залежно від температури можна знайти за формулою

$$\gamma = \frac{3463}{273 + t}. \quad (9.2)$$

Вітровий напір обумовлений тиском вітру і зростає зі збільшенням швидкості вітру. При віддаленні від поверхні землі швидкість вітру зростає, відповідно зі збільшенням висоти будинку зростає і вітровий тиск. Звичайно при проведенні розрахунків припускається, що швидкість вітру й аеродинамічний режим постійні за висотою будинку.

На поверхню стіни діє частина повного швидкісного напору вітру. Це явище враховується аеродинамічними коефіцієнтами, величина яких залежить від швидкості й напрямку вітру, конфігурації поверхні, кута, під яким діє вітер, від того, чи є поверхня навітряною або завітряною.

Для зовнішньої стіни, розташованої перпендикулярно до напрямку повітряного потоку, з навітряної сторони аеродинамічний коефіцієнт можна прийняти  $K_1 = 0,8$ ; для завітряної  $K_2 = -0,4$ . Це означає, що під дією вітру зовнішнє повітря входить у будинок через нещільності й пори навітряних огорожень, а внутрішнє виходить з будинку через завітряні огороження.

Розрахунковий середній надлишковий тиск вітру на поверхні огороження

$$\Delta P_W = \frac{\Delta P_W^{HAB} + \Delta P_W^{3AB}}{2} = \frac{P_W^{HAB} - P_W^{3AB}}{2}, \quad (9.3)$$

де  $\Delta P_W^{HAB} = P_W^{HAB} - P_{BH}$ ,  $\Delta P_W^{3AB} = P_{BH} - P_W^{HAB}$ ,

$$P_W^{HAB} = K_1 \frac{\gamma_{ЗОВН} \cdot w^2}{2} - \text{частка повного тиску вітру, що діє на наві-}$$

$$\text{тряну сторону огороження; } P_W^{3AB} = K_2 \frac{\gamma_{ЗОВН} \cdot w^2}{2} - \text{частка повно-}$$

го тиску вітру, що діє на завітряну сторону огороження;  $P_{BH}$  – тиск усередині приміщення;  $\gamma_{ЗОВН}$  – питома вага зовнішнього повітря при середній температурі найбільш холодної п'ятиденки забезпеченістю 0,92;  $w$  – максимальна зі швидкостей вітру по румбах за січень, повторюваність яких становить 16 % і більше.

Рівняння (9.3) у такому випадку має вигляд

$$\begin{aligned} \Delta P_W &= \frac{K_1 - K_2}{2} \cdot \frac{\gamma_{ЗОВН} \cdot w^2}{2} = \\ &= \frac{0,8 - (-0,4)}{2} \frac{\gamma_{ЗОВН} \cdot w^2}{2} = 0,03 \cdot \gamma_{ЗОВН} \cdot w^2. \end{aligned} \quad (9.4)$$

З рівнянь (9.1), (9.3), (9.4) випливає

$$\Delta P = 0,55 \cdot H \cdot (\gamma_{ЗОВН} - \gamma_{ВН}) + 0,03 \cdot \gamma_{ЗОВН} \cdot w^2, \quad (9.5)$$

Потрібний опір інфільтрації огорожуючої конструкції будинків (за винятком вікон, балконних дверей і ліхтарів) визначається як

$$R_I^{ПОТР} = \frac{\Delta P}{G^H}, \quad (9.6)$$

де  $\Delta P$  – знаходять за формулою (9.5),  $G^H$  – нормативна повітропроникність, кг/(м<sup>2</sup>·год·Па), (табл. 9.1).

Фактичний опір повітропроникненню відповідної огорожуючої конструкції,  $R_I$  має бути не менше потрібного  $R_I^{ПОТР}$ .

Для багатошарових конструкцій  $R_I$  визначається за формулою

$$R_I = R_{I1} + R_{I2} + \dots + R_{IN}, \quad (9.7)$$

де  $R_{Ii}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) – опір повітропроникненню окремих шарів огорожуючої конструкції, (м<sup>2</sup> год Па)/кг, що приймається за [1, 5, 6].

Слід мати на увазі, що для шарів конструкцій, які мають товщину, відмінну від наведеної в додатку Б, допускається приймати величину  $R_I$  прямо пропорційно товщині конструкції, що розраховується.

Заповнення світлових прорізів мають порівняно низькі теплозахисні властивості й підвищену повітропроникність. Необхідний опір інфільтрації для них знаходять за формулою

$$R_{II}^{ПОТР} = \frac{1}{G^H} \left( \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{2/3}, \quad (9.8)$$

де  $G^H$ ,  $\Delta P$  – те ж, що й у виразі (9.6);  $\Delta P_0 = 10$  Па – різниця тисків повітря, при якій експериментально визначені фактичні опори повітропроникненню заповнень світлових прорізів.

Вибір конструкції вікон, балконних дверей або ліхтарів проводять з урахуванням не тільки типу переплетень, але і якості ущільнення, при цьому обов'язково повинна бути дотримана умова

$$R_I \geq R_I^{ПОТР}. \quad (9.9)$$

У протилежному разі приймають іншу конструкцію, для якої справедливий вираз (9.9).

## **Вплив повітряного режиму на тепловий і вологісний режими огорожуючої конструкції**

Фільтрація повітря через зовнішні огорожуючі конструкції у холодний період року впливає на кількість теплоти, яку втрачає приміщення, і температуру внутрішньої поверхні огорожуючих конструкцій.

У стаціонарних умовах передачі теплоти зміна температури за товщиною одношарової стінки показана на рис. 9.2 лінією 1. При наявності фільтрації холодного зовнішнього повітря усередину приміщення (назустріч потоку теплоти) частина теплоти витрачається на нагрівання холодного повітря. При цьому температурне поле в конструкції знижується в порівнянні зі стаціонарним температурним полем (лінія 2 на рис. 9.2). Диференціальне рівняння переносу теплоти в плоскій одношаровій (багатошаровій) пористій стінці при фільтрації повітря для стаціонарних умов має вигляд

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} - c_p \cdot W \cdot \frac{\partial t}{\partial R} = 0, \quad (9.10)$$

де  $t$  – температура;  $c_p$  – ізобарна теплоємність повітря Дж/(кг °С);  $W$  – масова витрата повітря, кг/год;  $R$  – опір теплопередачі огорожуючої конструкції, (м<sup>2</sup> °С)/Вт.

Якщо потік повітря фільтрується через зовнішні огорожуючі конструкції зсередини приміщення назовні (ексфільтрація), температурне поле в конструкції підвищується по відношенню до стаціонарного розподілу температур (лінія 3 на рис. 9.2). Повітря, охолоджуючись, віддає теплоту матеріалу огорожуючої конструкції. Диференціальне рівняння переносу теплоти в цьому випадку виглядає так:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + c_p \cdot W \cdot \frac{\partial t}{\partial R} = 0. \quad (9.11)$$

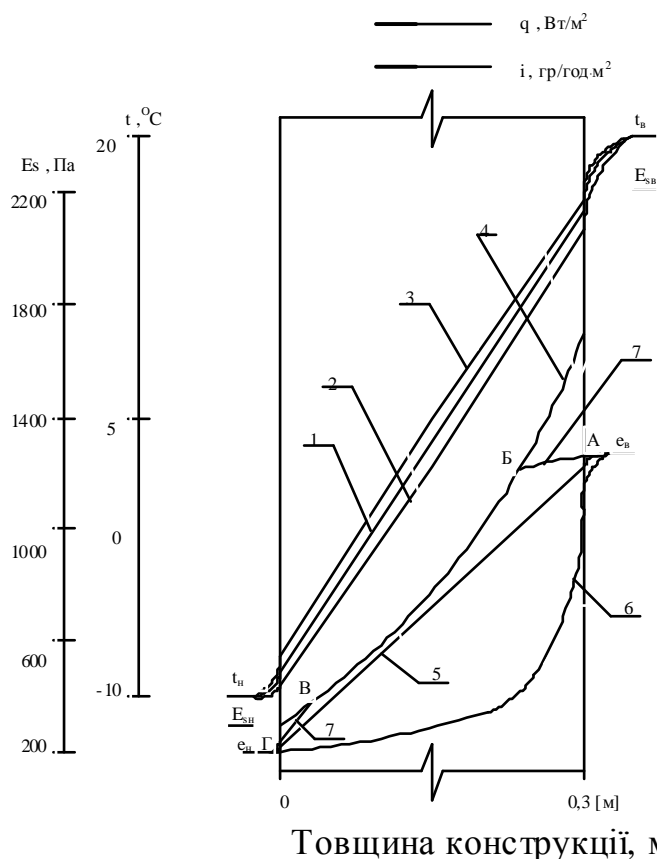


Рис. 9.2 – Розподіл температури і тиску водяної пари в керамзитобетонній конструкції:

- 1 - стаціонарний розподіл температур;
- 2 - те ж при інфільтрації і витраті повітря  $W=0,4$  кг/год;
- 3 - те ж при ексфільтрації;
- 4 - розподіл максимального тиску водяної пари;
- 5 - стаціонарний розподіл парціального тиску водяної пари;
- 6 - те ж при інфільтрації і витраті повітря  $W=0,4$  кг/год;
- 7 - те ж при ексфільтрації

Величина теплового потоку в перерізах огорожуючої конструкції

$$q_I = \frac{c_P W (t_{BH} - t_{ЗОВН})}{e^{c_P W R_O} - 1} e^{c_P W R}. \quad (9.13)$$

При ексфільтрації розподіл температур і величина теплового потоку в перерізах огорожуючої конструкції визначаються відповідно як

При виведенні цих рівнянь передбачалося, що швидкості фільтрації досить малі  $Re < 1$  і температура повітря, що фільтрується в кожному перерізі пористого огороження, дорівнює температурі основи матеріалу. Розв'язок рівнянь (9.10) і (9.11) для плоского огороження при фільтрації зовнішнього повітря отриманий Ф.В.Ушковим у наступному вигляді:

$$t_I = t_{H_H} + (t_{BH} - t_{ЗОВН}) \times \frac{e^{c_P W R} - 1}{e^{c_P W R_O} - 1}, \quad (9.12)$$

де  $R$  – опір теплопередачі огорожуючої конструкції до розглянутого перерізу,  $(m^2 \text{ } ^\circ C)/Wt$ ;  $R_O$  – загальний опір теплопередачі огорожуючої конструкції,  $(m^2 \text{ } ^\circ C)/Wt$ .

$$t_E = t_{3OBH} + (t_{BH} - t_{3OBH}) \frac{e^{c_P W R} - 1}{e^{c_P W R_O} - 1} \cdot \frac{e^{c_P W R_O}}{e^{c_P W R}}, \quad (9.14)$$

$$q_E = \frac{c_P W (t_{BH} - t_{3OBH})}{e^{c_P W R_O} - 1} \cdot \frac{e^{c_P W R_M}}{e^{c_P W R}}. \quad (9.15)$$

При фільтрації холодного зовнішнього повітря через вологе пористе огороження вологість конструкції зменшується. Зовнішнє холодне повітря акумулює частину водяної пари, його вологовміст підвищується і водяні пари виносяться назад у повітря приміщення. При цьому відбувається осушування огорожуючої конструкції. Якщо відбувається фільтрація внутрішнього повітря назовні приміщення, температура повітря, що фільтрується, швидко досягає температури точки роси при даному тиску водяної пари. Починається термічна конденсація водяної пари, при якій огорожуюча конструкція зволожується.

Стационарний процес дифузії водяної пари в огороженні при інфільтрації вологого повітря описується диференціальним рівнянням у частинних похідних (одновимірний випадок):

$$\frac{\mu}{\xi_O \rho} \cdot E_t \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} - \frac{c_e \cdot W}{\xi_O \rho} \cdot E_t \cdot \frac{\partial e}{\partial x} = 0. \quad (9.16)$$

При ексфільтрації перед другим доданком рівняння (9.16) треба поставити знак (+).

Перший доданок рівняння (9.16) описує дифузію водяної пари в огороженні при стаціонарних умовах, другий – визначає зміну парціального тиску водяної пари в результаті фільтрації вологого повітря.

Повітря поряд з акумулюванням теплоти має властивість утримувати водяну пару. Складова рівняння (9.16), що описує це явище, називається вологоємністю повітря  $c_e$  і являє собою аналог теплоємності повітря у процесах теплопередачі. Відповідно до визначенням, питома вологоємність – це зміна вологовмісту повітря при зміні парціального тиску водяної пари на 1 Па, г/(кг·Па), являє собою похідну від вологовмісту за парціальним тиском водяної пари:

$$c_e = \frac{622 \cdot P_B}{\left( P_B - \frac{\varphi}{100} \cdot E_s \right)^2}, \quad (9.17)$$



де  $P_B$  – барометричний тиск повітря, Па;  $\varphi$  – відносна вологість повітря, %;  $E_s$  – максимальний тиск водяної пари в повітрі при даній температурі, Па.

Питома вологоємність повітря змінюється залежно від температури й відносної вологості повітря. У діапазоні температур від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  при постійній відносній вологості повітря  $\varphi=100\%$  величина  $c_e$  змінюється на  $10\%$ . Тому в розрахунках не можна приймати  $c_e = \text{const}$ .

Зміна питомої вологоємності повітря залежно від температури й відносної вологості повітря подана на рис. 9.3.

Відносна вологість водяної пари у повітрі, що фільтрується через вологий матеріал, також є величиною змінною. Вона залежить від початкового парціального тиску водяної пари повітря, енергії зв'язку капілярної рідини з основою матеріалу, а також від режиму руху повітря по капілярах. У практичних розрахунках відносну вологість водяної пари у повітрі, що фільтрується через вологий матеріал, приймають від  $60$  до  $95\%$ .

На рис. 9.2 наведені температурне поле й поле парціального тиску водяної пари для одношарової керамзитобетонної конструкції при фільтрації повітря. Умови тепло- і вологообміну на поверхні показані в масштабі опору конструкції відповідному процесу. В умовах ексфільтрації, при наявності в огороженні градієнтів температури й парціального тиску водяної пари, останній в перерізах конструкції досягає максимально можливого тиску (рис. 9.4, лінія АБ, ВГ). Наступає капілярна, а потім і термічна конденсація (ділянка БВ, рис. 9.3). Як свідчать розрахунки, розмір зони конденсації в більшій мірі залежить від масової витрати повітря, що фільтрується через огороження, ніж від величини парціального тиску водяної пари повітря приміщення. Тому ексфільтрація призводить до збільшення вологості огороження навіть у будинках із сухим режимом експлуатації. Даний процес характерний для верхніх поверхів багатоповерхових житлових будинків, а також для цехів, обладнаних приточно-витяжною вентиляцією, що підтримує надлишковий тиск, виходячи з умов технологічного процесу.

Навпаки, фільтрація холодного зовнішнього повітря впливає на огороження. Розгляд полів парціального тиску водяної пари свідчить, що зниження температури точки роси в перерізах матеріалу за рахунок інфільтрації зовнішнього холодного повітря в кілька

разів перевищує зниження температури матеріалу, навіть при малих величинах масової витрати повітря (рис. 9.3).

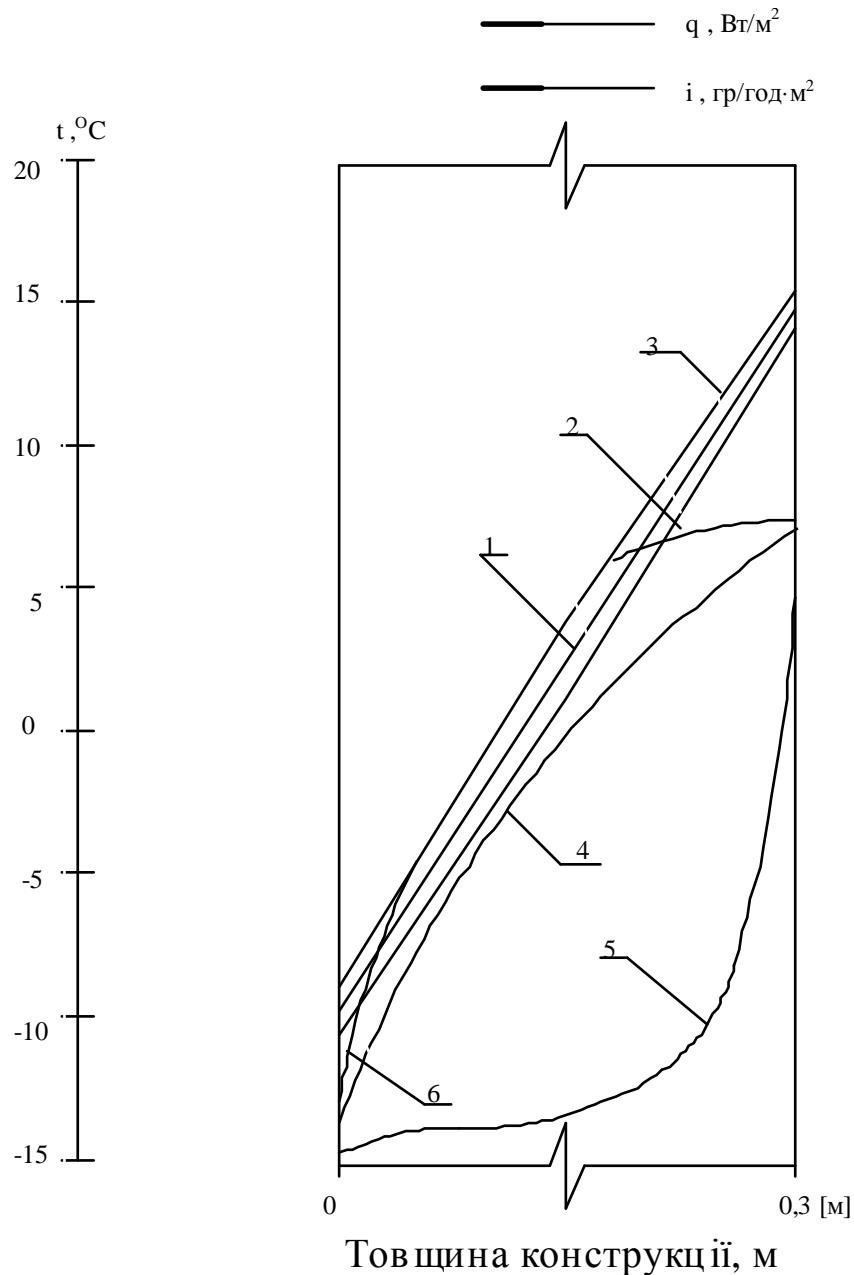


Рис.9.3 – Розподіл температур у керамзитобетонній конструкції:

- 1 - стаціонарний розподіл температур;
- 2 - те ж при інфільтрації й витраті повітря  $W=0,4$  кг/год;
- 3 - те ж при ексфільтрації;
- 4 - розподіл температури точки роси, обчислений за стаціонарним розподілом парціального тиску водяної пари;
- 5 - розподіл температури точки роси, обчислений за стаціонарним розподілом парціального тиску водяної пари з урахуванням інфільтрації, при витраті повітря  $W=0,4$  кг/год;
- 6 - те ж з урахуванням ексфільтрації.

## **Контрольні запитання**

1. Повітропроникнення. Фактори, що спричиняють проникнення повітря через огорожуючі конструкції.
2. Визначення опору повітропроникнення для суцільних і світлопрозорих огорожуючих конструкцій.
3. Що таке нейтральна зона? Де й при яких умовах вона розташовується у приміщенні?
4. Дайте поняття про інфільтрацію і ексфільтрацію в будинку.
5. Як впливає проникнення повітря на тепловий і вологісний стан суцільних огорожуючих конструкцій?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СНиП II.3.-79\*\*. Строительная теплотехника. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1981.
2. СНиП 2.01.-82. Строительная климатология и геофизика. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.,: Высш. шк., 1985.
4. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Техническая теплофизика ограждающих конструкций и сооружений / Под ред. проф. Маляренко В.А. – Харьков: Рубикон, 2001.
5. Маляренко В.А. Основы теплофизики зданий и энергосбережения. – Харьков: ХНАМГ, 2006.
6. Маляренко В.А. Основи теплофізики будівель і енергозбереження. – Харків: САГА, 2006.
7. Маляренко В.А., Герасимова О.М. Навчально-методичний посібник до практичних занять і самостійної роботи до курсу «Будівельна теплофізика» для студентів спец. 7092108 «Теплогазопостачання і вентиляція» денної і заочної форми навчання. – Харків: ХНАМГ, 2007.

**Навчальне видання**

**Будівельна теплофізика**

Курс лекцій

для студентів усіх форм навчання будівельних спеціальностей

Укладачі: **Віталій Андрійович Маляренко,  
Ольга Михайлівна Герасимова  
Олександр Іванович Малєєв**

Відповідальний за випуск: Л.В.Гапонова

Редактор М.З.Аляб'єв

План 2007, поз. 126

---

Підп. до друку 22.01.07 р.	Формат 60x84 1/16	Папір офісний
Друк на ризографії	Умовн.-друк. арк. 4,5	Обл.-вид. арк. 5,0
Замовл. №_____	Тираж 150 прим.	

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ  
61002, Харків, вул. Революції, 12